

**V Š B – T e c h n i c k á u n i v e r z i t a O s t r a v a**  
**F a k u l t a e l e k t r o t e c h n i k y a i n f o r m a t i k y**  
**K a t e d r a e l e k t r o n i k y**

**Modernizace stejnosměrného pohonu kolejového vozidla**  
**Modernisation of Rail Vehicle DC Drive**

**Rok 2010**

**Petr Novák**

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Petr Novák**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika

Téma:

Modernizace stejnosměrného pohonu kolejového vozidla  
Modernisation of Rail Vehicle DC Drive

Zásady pro vypracování:

1. Analýza stávajícího stavu
2. Návrh motoru pro pohon
3. Návrh měniče pro pohon
4. Zhodnocení variant pohonu kolejového vozidla

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího závěrečné práce

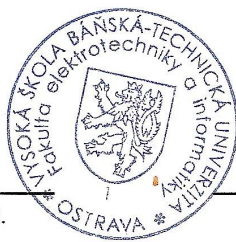
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ivo Neborák, CSc.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení**

*Prohlašuji, „ že jsem svou bakalářskou práci na téma Modernizace stejnosměrného pohonu kolejového vozidla napsal samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

*Že jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.*

*Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou/diplomovou práci užít (§35 ods. 3).*

*Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské/diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a údaje o bakalářské /diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.*

*Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.*

*V Novém Jičíně, dne 5.5.2010*

.....  
*Petr Novák*

## **Poděkování**

*Na tomto místě chci poděkovat své rodině a především své ženě, za velkou podporu při studiu na VŠB. Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Ivo Neborákovi, CSc. za konzultace a odborné vedení. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svému zaměstnavateli panu Ing. Jaromilu Spáčilovi, za vstřícný přístup k mému studiu.*

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem nového DC a AC pohonu pro speciální kolejové vozidlo. Návrh vychází z požadavků získaných ze zkušebního provozu. Důvodem návrhu je nedostatečná funkce stávajícího pohonu. Pohon je napájen z 24 V baterie. Jsou zde popsána možná řešení návrhu pohonu a taky praktická zjištění z průzkumu nabídky trhu o dostupnosti některých komponentů. V závěru práce je provedeno zhodnocení jednotlivých variant z několika hledisek. Je zde také zmíněn návrh na koncepční změnu pohonu, která by pravděpodobně přinesla několik výhod.

## **Klíčová slova**

Pohon; DC; AC; motor; měnič; pracovní cyklus; efektivní moment

## **Abstract**

This work deals with a new design for DC and AC drive for a special rail vehicle. Proposal is based on requirements derived from the test operation. This work was motivated by lack of function of the current drive. The drive is powered from 24 V battery. It describes possible design solutions of the drive and also some practical findings from the survey of supply market on the availability of certain components. The conclusion is for an assessment of various options in several respects. It also mentioned a proposal to conceptual change of the drive, that would likely bring several benefits.

## **Keywords**

Drive; DC; AC; motor; controller; working cycle; effective moment

## Seznam použitých symbolů a zkratk

AC	střídavý
AKB	akumulátorová baterie
AV	střední hodnota
DC	stejnosměrný
EC	elektronicky komutovaný
EMC	elektromagnetická kompatibilita
$I_a$	proud kotvy motoru [A]
$I_q$	momentotvorná složka proudu kotvy AC motoru [A]
$I_0$	proud motoru na prázdko [A]
$M$	moment [Nm]
$P$	výkon [W]
PM	pracovního mechanismus, permanentní magnety
POJ	počítačová ovládací jednotka
RDS	radiomodem
RKV	rádiové kolejové vozidlo
RoR	ruční ovladač rádiový
ŘS	řídící systém
SW	software
VŠB-TUO	Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
$c\phi$	součin konstrukční konstanty motoru a magnetického toku [Vs]
$ekv$	ekvivalentní
$i$	převodový poměr [-]
$k_f$	činitel „odbuzení“ motoru [-]
$max$	maximální
$n$	otáčky [ot/min]
$nom$	nominální
$q_m$	činitel krátkodobého přetížení motoru [-]
$r$	poloměr [m]
$red$	redukovaný
18	index při které se RKV pohybuje rychlostí 18 km/h
$\pi$	Ludolfovo číslo
$\eta$	účinnost [- , %]
$\omega$	úhlová rychlost [rad/sec]

# Obsah

Úvod	1
<b>1. Analýza stávajícího stavu</b>	<b>2</b>
1.1. Parametry a technická data RKV	2
1.2. Popis funkce	3
1.3. Nedostatky stávajícího pohonu	5
1.4. Požadavky na provoz RKV	5
<b>2. Návrh pohonu obecně</b>	<b>6</b>
2.1. Volba typu pohonu pro RKV	7
<b>3. Návrh motoru pro pohon</b>	<b>7</b>
3.1. Stanovení pracovního cyklu stávajícího motoru	8
3.2. Stanovení parametrů nového motoru	11
3.3. Výběr motoru	13
3.4. DC motor	14
3.5. AC motor	15
<b>4. Návrh měniče pro pohon</b>	<b>16</b>
4.1. Pracovní cyklus DC měniče	17
4.2. Stanovení parametrů DC měniče	22
4.3. Pracovní cyklus AC měniče	22
4.4. Stanovení parametrů AC měniče	25
<b>5. Zhodnocení variant pohonu kolejového vozidla</b>	<b>26</b>
5.1. Cena navrženého DC a AC pohonu	27
5.2. Zhodnocení: DC pohon versus AC pohon	28
5.3. Celkové zhodnocení	29
<b>6. Závěr</b>	<b>31</b>
<b>7. Literatura</b>	<b>32</b>
<b>8. Seznam příloh</b>	<b>33</b>

## Úvod

Již delší dobu pracuji jako elektrotechnik v malé soukromé firmě, která se převážně zabývá vývojem a výrobou elektronických a elektromechanických zařízení. Většinou jsou to speciální jednoúčelová zařízení malé sériové výroby, napájena ze sítě 230 V / 50 Hz nebo z baterií 12-24 V, rádiově ovládána a řízena mikrokontroléry PIC, firmy Microchip.

Zařízení popisované v této práci, má pracovní název Rádiový Kolejový Vozík, zkráceně RKV. Jedná se o podvozek s vlastním elektrickým pohonem a řídicím systémem, který jezdí po rozměrově standardních železničních kolejích a převáží VRZ - Velký Rádiový Zvedák, na kterém je upevněna silueta například nákladního automobilu. Celé zařízení pak z dálky působí dojmem jedoucího auta, což je požadovaný efekt.

Jde o jednoúčelové zařízení, které naše firma vyvíjí téměř od začátku. Téměř proto, že „vzor“ vozíku, ze kterého vzešel RKV, je již dlouhá léta používán, ovšem s tím rozdílem, že je po kolejích tažen ocelovým lanem, které přes hnací mechanismus pohání 7 kW elektromotor, napájený ze sítě 3 x 400 V / 50 Hz. Mezi největší nevýhody tohoto systému patří časté mechanické závady hnacího zařízení, mnohdy z následkem spálení elektromotoru nebo přetržením ocelového lana délky až 800 m. Také údržba stávající elektroinstalace, většinou staré 30-40 let, není jednoduchá. To vše bylo důvodem vzniku RKV.

V počáteční fázi tohoto projektu se nekladl až tak velký důraz na „dokonalost“ veškerých komponentů, elektropohon nevyjímaje, ale především na zprovoznění funkčního vzorku a jeho prezentaci zákazníkovi. Dá se říci, že tento úkol byl splněn a projekt RKV, se v současné době nachází ve fázi doladování, s čímž je také spojen návrh vhodnějšího motoru a měniče.

Z odstupem času a hlavně se stále nově přibývajícími znalostmi ze studia výkonové elektrotechniky na VŠB – TUO a také zkušenostmi z provozu RKV, zjišťuji, kde všude má stávající pohon větší či menší nedostatky. Hlavní náplní této práce je popsát slabá místa stávajícího elektropohonu a navrhnout nový.

Vzhledem k tomu, že kromě výběru motoru, jsem vytvořil převážnou část elektroinstalace RKV, počínaje návrhem a realizací řídicího a výkonového bloku, přes napsání programu do mikrokontroléru a konče fyzickým zapojením a zprovozněním RKV, je pro mě zpracování tohoto úkolu o to více zajímavější a přínosnější.

## 1. Analýza stávajícího stavu



*Obr.1 RKV s VRZ a siluetou většího dopravního prostředku*

### 1.1.Parametry a technická data RKV

Motor:	DC, sériový, Iskra, typ: AMK 4637/11.216.110, $P = 3 \text{ kW}$ , $M_n = 12 \text{ Nm}$ , $n = 2400 \text{ ot/min}$ , $U_n = 24 \text{ V}$ , $I_n = 200 \text{ A}$ , $S_2 = 4 \text{ min}$ , $P_0 = 4,8 \text{ kW}$ , $\eta_n = 62,5 \%$ , izolační třída F.
Převodovka:	Šneková, $i = 1:7.5$ , $\eta = 88 \%$ , Maximální vstupní výkon $2,3 \text{ kW}$ , $n = 2800 \text{ ot/min}$ , $M_{max} = 51 \text{ Nm}$ , typ XF50.
Baterie:	Trakční, olověná, $24 \text{ V}$ , $300 \text{ Ah}$ , (6 x $12 \text{ V}$ , $100 \text{ Ah}$ , sérioparalelní zapojení).
Měnič:	1 kvadrantový, (bez ochrany proti zkratu a tepelnému přetížení).



Další upřesnění:	Dvě nápravy, z toho jedna hnací náprava a současně brzdící pomocí motoru, druhá slouží pouze k dobrzdění a „fixaci“ RKV v klidovém stavu na místě.
Brzda parkovací :	Kotoučová, ovládaná malým elektromotorem s převodovkou.
Brzda provozní:	Motorová, (protiproudové brzdění).
Ovládání:	Rádiovými povely z RoR nebo POJ a místně pomocí RO.
Hmotnost:	400 kg
Nosnost:	400 kg
Celková hmotnost:	800 kg
Pracovní teplota:	-20 až + 40 °C
Rozměry:	1650 x 2250 x 350 mm
Krytí:	IP65

## 1.2. Popis funkce

Jak již bylo zmíněno, zařízení je určeno k simulaci jízdy např. nákladního auta. Jde o to, aby v pozorovateli vzbudilo dojem příjíždějícího, odjíždějícího nebo kolem projíždějícího auta, což záleží na stanovišti pozorovatele. RKV je součástí blíže nespecifikovaného výcvikového zařízení a vychází z potřeby jeho modernizace.

RKV je ovládán dálkově rádiovými povely pomocí POJ, případně RoR, nebo místně s použitím ručního ovladače. Řídící jednotka POJ je tvořena notebookem se speciálním softwarem, RDS a baterií. Provoz POJ je možný ze sítě 230 V / 50 Hz, nebo z vestavěné baterie po dobu 1-3 hodin. Komunikační protokol je nestandardní.

Je-li vydán povel k jízdě jedním nebo druhým směrem a jsou-li splněny všechny podmínky rozjezdu, RKV se rozjede požadovanou rychlostí. V praxi jsou potřebné dvě rychlosti, které RKV umožňuje. Tzv. manipulační, 4 km/h a provozní 18 km/h. Zvolenou rychlost udržuje po celou dobu jízdy. Výjimku tvoří fakt, kdy RKV jede z mírného kopce s větrem v „zádech“. V tomto případě neumí regulovat, (snížit), rychlost větší než je požadovaná a při jejím překročení pouze přestane

dodávat energii do motoru. Kromě toho řídící systém RKV také kontroluje, zda-li nebyl vydán povel k předčasnému zastavení, jestli nedošlo k vykolejení, či jiné poruše a jestli už nedorazil do cíle. Cílem jízdy je téměř vždy jedna z krajních poloh kolejové dráhy. Po dosažení této polohy RKV automaticky zastaví. K zajištění proti samovolnému pohybu, např. za větrného počasí, slouží parkovací brzda. Při místní manipulaci pomocí ručního ovladače se RKV pohybuje rychlostí cca 4 km/h.

Protože z počátku vývoje nebylo nutné udržovat zcela přesnou rychlost, byl pro její snímání použit jednoduchý systém, který poskytuje pouze 8 impulsů na otáčku nápravy. Při převodovém poměru 7,5:1, se jedná o jeden impuls na jednu otáčku motoru. Z toho vyplývá relativně nepřesná a pomalá regulace rychlosti RKV. (Zvláště při nižší manipulační rychlosti).

Bezkontaktní snímání krajních poloh RKV je realizováno pomocí magnetických snímačů, nacházejících se na konstrukci RKV a silných permanentních magnetů vhodně umístěných v kolejišti. V případě jejich poruchy je RKV vybaven přídatnými mechanickými vypínači, které se aktivují po projetí tzv. bezpečnostním místem kolejové dráhy a způsobí vyřazení výkonového systému pohonu. RKV pak zastaví pomocí parkovací brzdy. Ta je v tomto případě ovládána nezávislým jednoúčelovým kombinačním obvodem.

Pro standardní zastavení jedoucího RKV se používá princip brzdění protiproudem. Je to především z důvodu níže zmíněného konstrukčního řešení použitého motoru. Nelze tedy použít brzdění do odporu ani rekuperační brzdění. V první, (hlavní) fázi brzdění je nastavena velikost protiproudu na 20 A. Tento relativně malý proud vyvolá při rychlosti RKV 18 km/h dosti velký brzdící účinek. V druhé fázi, (dobrzdění), kdy se RKV pohybuje rychlostí menší než 3 km/h se „aktivuje“ parkovací brzda a RKV zcela zastaví.

Přestože je motor ovládán jedno kvadrantovým měničem, pohon umožňuje jízdu oběma směry. Motor má vyvedené vinutí pouze na tři svorky tak, že k jedné společné svorce vinutí je připojen měnič a k další druhé nebo třetí se podle požadovaného směru jízdy, připojí plus pól baterie pomocí výkonových stykačů.

Řídící systém pohonné jednotky umožňuje kontrolu a regulaci proudu motorem. Měření proudu probíhá v samostatném modulu, který po sériové lince neustále vysílá informaci o velikosti proudu motorem do ŘS.

### Další funkce RKV

- Po zastavení RKV informuje obsluhu POJ o splněním úkolu.
- Možnost místního nouzového zastavení a vyřazení celého systému z činnosti.
- Měření a vyhodnocení napětí AKB + ochrana proti hlubokému vybití AKB.
- Při poruše, (např.: vykolejení, nezdařený rozjezd, apod.), odešle hlášení do POJ.
- Záznam celkové ujeté vzdálenosti, (pro servisní účely).

### Podmínky rozjezdu RKV

- Zapnutý hlavní vypínač.
- Napětí AKB je větší než 21 V.
- Zapnutý odpojovač baterií.
- Neaktivní nouzové vypínače.
- Je-li RKV v krajní poloze, rozjezd je možný pouze na opačnou stranu.

## **1.3. Nedostatky stávajícího pohonu**

- Malá účinnost motoru - 62,5 %.
- Nelze jednoduše regulovat maximální rychlost RKV, (při jízdě z kopce, s větrem v zádech)
- Motor ani měnič neumožňují rekuperační brzdění.
- Prokluzování kol v nepříznivých klimatických podmínkách.
- Měnič nemá ochranu proti zkratu ani proti teplotnímu přetížení.

## **1.4. Požadavky na provoz RKV**

- Náhon na obě dvě nápravy , (RKV budou pohánět dva motory, každý s vlastní převodovkou a měničem. Tato podmínka vyplynula z testování RKV za nepříznivých podmínek počasí, které způsobovali prokluzování kol při rozjezdu a hlavně při brzdění).
- Délka dráhy po které se RKV pohybuje je v rozmezí 200 – 400 metrů.
- Požadovaná pracovní rychlost RKV je 15 - 18 km/h při jízdě v bezvětří.
- Minimální stoupavost 1 % při pracovní rychlosti rychlost 15 km /h.
- Předpokládané vytížení zařízení RKV , (bez přestávek), max.: 25-35 hodin za měsíc.

### Doplňující informace potřebné pro návrh pohonu

- Nízká cena pohonu.
- Dobrá dostupnost komponentů, účinnost, jednoduché ovládání apod.
- Zachování stávajícího napájecího napětí pohonu 24 V.
- Možnost regulace proudu motoru.
- Ochrana měniče proti zkratu a teplotnímu přetížení.
- Přesnější regulace rychlosti, rekuperační brzdění.
- Průměr kol RKV je 272 mm, obvod kol 854,5mm, viz. (1).
- Otáčky motoru  $n$  při rychlosti RKV 18 km/h, viz. (2).

### Výpočet obvodu kola RKV

$$\text{obvod kola } [m] = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 0,136 = 0,8545m = 854,5mm \quad (1)$$

### Výpočet otáček motoru při rychlosti RKV 18 km/h

$$n = \frac{\text{rychlost RKV } [m/s]}{\text{obvod kola } [m]} \cdot 60 \cdot i = \frac{5}{0,8545} \cdot 60 \cdot 7,5 \doteq 2634 \text{ ot/min} \quad (2)$$

## **2. Návrh pohonu obecně**

Při návrhu pohonu je důležité si uvědomit několik věcí. Je potřeba vědět jaká je požadovaná funkce pohonu. Kromě požadovaného výkonu, výstupních otáček a momentu také další údaje. Tedy jedná-li se o pohon regulovaný nebo neregulovaný, jaký bude druh zatížení, jaký je požadavek na dynamiku pohonu, jestli a jaký bude princip brzdění motoru, jak dlouhá bude doba rozběhu a brzdění, jaké bude vytíženost pohonu, je-li nutná reverzace či přesná regulace otáček, polohy nebo proudu respektive momentu. Dále jaké jsou požadavky na spolehlivost a životnost, otázka EMC. Také jaké jsou prostorové možnosti umístění pohonu, požadavek na krytí, chlazení apod. Důležitá okolnost je samozřejmě, v jakém pracovní prostředí bude pohon pracovat. (Prostředí s nebo bez nebezpečí výbuchu, okolní teplota, nadmořská výška, atd.), viz. [1], [2] A ve většině případů je asi nejdůležitější cena pohonu.

Po zodpovězení výše naznačených kritérií, je potřeba se rozhodnout pro typ pohonu. Použít můžeme DC nebo AC pohon. Pro DC pohon můžeme teoreticky použít buď motor sériový, který jeho momentová charakteristika přímo předurčuje k elektrické trakci, jelikož má velký záběrový moment anebo motor s cizím buzením respektive s permanentními magnety. Dále pak EC motor jehož velká výhoda je v tom, že nemá komutátor. Z AC motorů se používají asynchronní případně synchronní motory. Pro pohony, které nevyžadují regulaci otáček, se většinou používají poslední zmiňované AC motory. U regulovaných pohonů se budeme rozhodovat mezi DC a AC pohonem. Podrobnější popis jednotlivých typů motorů a jejich výhody a nevýhody, viz. [2]

## **2.1. Volba typu pohonu pro RKV**

Na počátku vývoje RKV, v roce 2006, se také rozhodovalo, zda-li použít DC nebo AC pohon. Praxe byla taková, že informace o jediném dostupném AC pohonu s asynchronním motorem, který splňoval požadované parametry, byly nedostačující a hlavně cena celého pohonu byla neúměrně vysoká. Proto je stávající pohon RKV stejnosměrný. Nyní se znovu pokusím o návrh varianty jak DC pohonu s komutátorovým a EC motorem, tak AC pohonu s asynchronním, případně synchronním motorem.

## **3. Návrh motoru pro pohon**

Při návrhu motoru vycházíme z obecné podmínky a to, že jmenovitý výkon motoru se stanoví tak, aby se jeho oteplení při požadovaném provozu, co nejvíce přiblížilo dovolenému oteplení, které je dáno izolační třídou motoru. Dále je nutné znát pracovní charakteristiky motoru, zejména pak závislost proudu a otáček na momentu. Podle toho v jakém režimu zatížení bude motor pracovat, se stanoví metoda návrhu motoru.

V našem případě jde o zatížení S3, což je přerušovaný chod. Pro tento typ zatížení se používá metoda ekvivalentního momentu, respektive proudu, viz. [1], [2]. Protože se jedná o zařízení, které je již v provozu, bylo možné na něm provést měření. Z naměřených hodnot a z dalších požadavků na provoz, viz. kapitola 1.4., se bude při návrhu nového pohonu vycházet. Ze všeho nejdříve je potřeba stanovit pracovní cyklus stávajícího motoru. To je zpravidla 10 minutový úsek s největším typickým zatížením.

### 3.1. Stanovení pracovního cyklu stávajícího motoru

Z měření provedeného na stávajícím zařízení, viz. **Tab.1** a na základě požadavků na provoz RKV, jsem vytvořil tabulku **Tab.2** a z ní pak sestrojil graf „nejhorší“ varianty pracovního, (zatěžovacího), cyklu motoru, viz. **Obr.2**. V **Tab.2** jsou pro porovnání uvedeny hodnoty pracovního cyklu i pro rychlost RKV 17 km/h , která také vyhovuje zadání. V dalším textu však budeme při návrhu nového pohonu počítat pouze s variantou, ve které požadujeme pracovní rychlost RKV 18 km/h a délku dráhy 400 m.

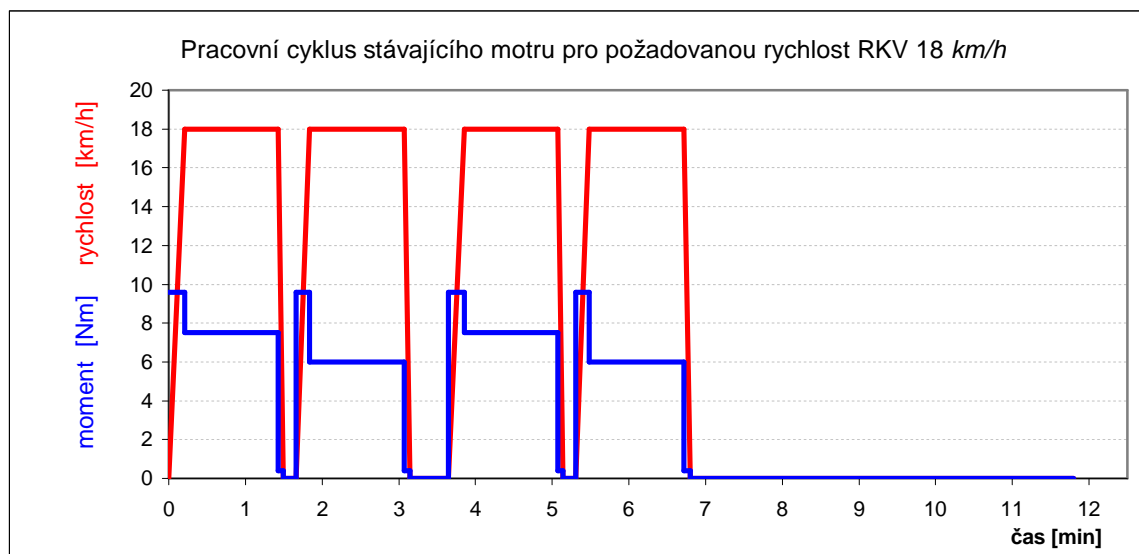
Pro upřesnění je třeba uvést, že průměrná doba protiproudového brzdění, byla měřena při velikosti protiproudu 20 A. Trať, na které bylo měření prováděno, měla stoupání, respektive klesání přibližně 1%. Měření bylo prováděno při bezvětří, teplota okolí byla cca 18 °C a baterie RKV byly nabity na 80 % své kapacity, (cca 25,2 V). K měření proudu byl použit klešťový ampérmetr DT-9701 a průběhy zatížení byly zaznamenány na video. Po analýze těchto záznamů vznikla tabulka **Tab.1**

Směr jízdy	Žádaná rychlost RKV [km/]	Proud motoru při rozjezdu omezen na [A]	Čas potřebný k rozjezdu na požadovanou rychlost [s]	Maximální čas potřebný k rozjezdu na požadovanou rychlost [s]	Proud při jízdě požadovanou rychlostí [A]	Maximální proud při jízdě požadovanou rychlostí [A]	Průměrná doba proti proudového brzdění [s]
Do kopce	17	150	12,7	13,5	98	105	3,2
			12,9		100		
			13,5		104		
Z kopce	17	150	11	12	83	90	4,2
			11,3		85		
			11,9		90		
Do kopce	18	170	11,9	12,5	138	145	4
			12,2		141		
			12,4		143		
Z kopce	18	170	9,3	10,5	115	120	5
			10,1		118		
			10,5		120		

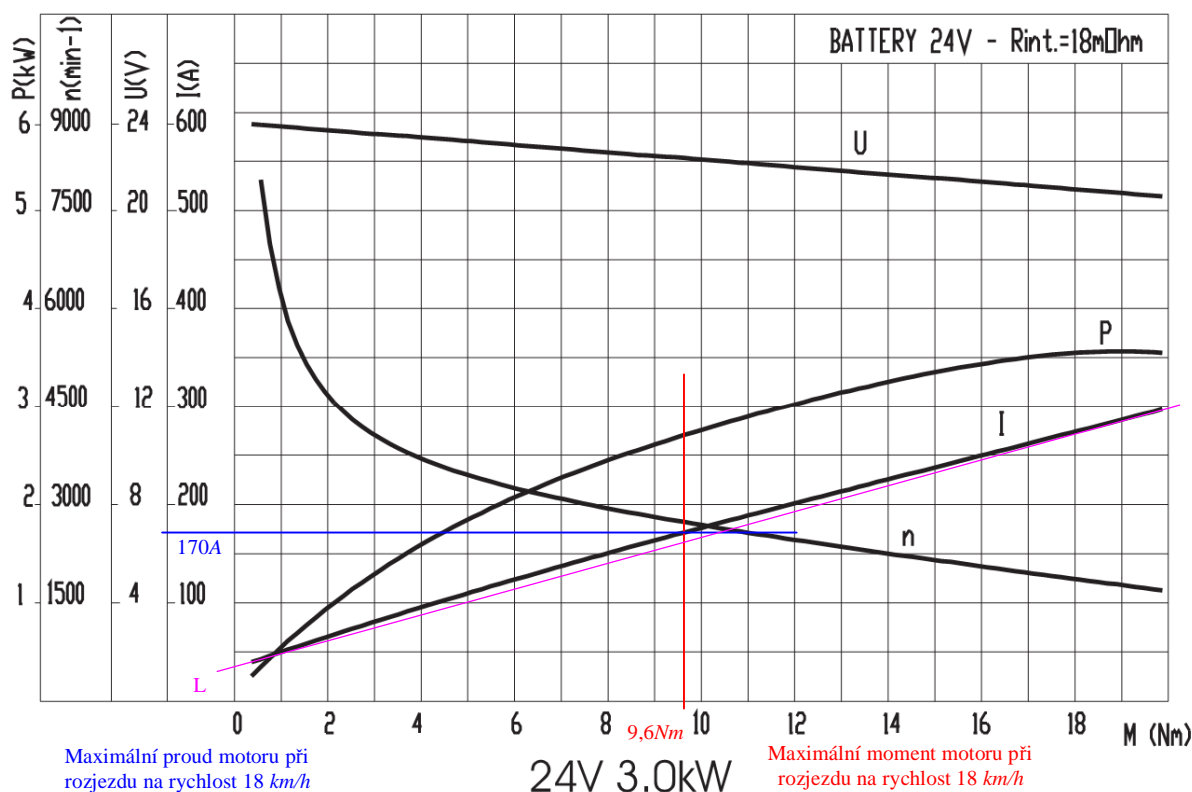
**Tab.1** Naměřené hodnoty při reálném provozu RKV

	Pracovní cyklus RKV požadovaná rychlost 17 km/h				Pracovní cyklus RKV požadovaná rychlost 18 km/h			
Stav RKV	čas [s]	proud [A]	Rychlost [km/h]	Moment motoru [Nm]	čas [s]	proud [A]	Rychlost [km/h]	Moment motoru [Nm]
Rozjezd do kopce	13,5	150	0 - 17	8,0	12,5	170	0 - 18	9,6
Jízda do kopce	81	105	17	4,5	73	145	18	7,5
Brzdění do kopce	3,2	30	17 - 0	0,4	4	30	18 - 0	0,4
Přestávka	10	0	0	0,0	10	0	0	0,0
Rozjezd z kopce	12	150	0 - 17	8,0	10,5	170	0 - 18	9,6
Jízda z kopce	82	90	17	4,0	74	120	18	6,0
Brzdění z kopce	4,2	30	17 - 0	0,4	5	30	18 - 0	0,4
Přestávka	30	0	0	0,0	30	0	0	0,0
Rozjezd do kopce	13,5	150	0 - 17	8,0	12,5	170	0 - 18	9,6
Jízda do kopce	81	105	17	4,5	73	145	18	7,5
Brzdění do kopce	3,2	30	17 - 0	0,4	4	30	18 - 0	0,4
Přestávka	10	0	0	0,0	10	0	0	0,0
Rozjezd z kopce	12	150	0 - 17	8,0	10,5	170	0 - 18	9,6
Jízda z kopce	82	90	17	4,0	74	120	18	6,0
Brzdění z kopce	4,2	30	17 - 0	0,4	5	30	18 - 0	0,4
Přestávka	300	0	0	0,0	300	0	0	0,0

**Tab.2** Časy a proudy pracovního cyklu RKV + zatěžovací momenty stávajícího motoru



**Obr.2** Pracovní cyklus RKV – zatěžovací diagram stávajícího motoru pro rychlost 18 km /h



**Obr.3** Charakteristiky stávajícího motoru RKV - AMK 4637/11.216.110

Podíváme-li se na pracovní charakteristiky stávajícího motoru **Obr.3**, (dodané výrobcem motoru [11]), na první pohled se zdá, že závislost mezi momentem  $M$  a proudem  $I$  je vzhledem k použitému motoru lineární. Přesto je vidět, dle naznačené přímky **L**, že tomu tak není. Obecně totiž pro sériové DC motory platí, že magnetický tok je funkcí proudu kotvy (3), tzn. že buzení motoru je závislé na jeho zatížení a tedy i charakteristika závislosti otáček a proudu na momentu je nelineární. Z **Obr.3** usuzuji, že motor pracuje v oblasti nasycení. [2]

$$M = c\phi(I_a) \cdot I_a \quad (3)$$

Nyní je potřeba ke každému proudu, který nás zajímá, přiřadit odpovídající moment viz. **Tab.2**. V tomto případě jsem odečetl příslušné momenty přímo z **Obr.3**. (V jiném případě by bylo nutné zkonstruovat závislost proudu na momentu výpočtem. K tomu bychom museli znát závislost  $\phi = f(I_a)$ ). Z odečtených momentů jsem pak vypočítal ekvivalentní moment stávajícího motoru. Při výpočtech jsem pominul zohlednění zhoršeného ochlazování motoru při rozjezdu a brzdění RKV, neboť tyto časy představují relativně malou část pracovního cyklu.



Ekvivalentní moment stávajícího motoru pro rychlost RKV 18 km/h jsem označil  $M_{ekv18}$ . Vypočtený moment (4) se vztahuje k celkové délce pracovního cyklu 11 min a 48 sec, která vystihuje lépe zatížení motoru než normované délka cyklu 10 min. Pro informativní porovnání jsem vypočetl ekvivalentní moment motoru s označením  $M_{ekv17}$ , pro rychlost RKV 17 km/h, viz. (5), která také vyhovuje požadavkům zadání.

Výpočet ekvivalentního momentu motoru pro rychlost RKV 17 a 18 km/h

$$M_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T M^2 dt} = \sqrt{\frac{M_{e1}^2 \cdot \Delta t_1 + M_{e2}^2 \cdot \Delta t_2 + \dots + M_{em}^2 \cdot \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m}}$$

$$M_{ekv18} = \sqrt{\frac{(9,6^2 \cdot 12,5 + 7,5^2 \cdot 73 + 0,4^2 \cdot 4 + 9,6^2 \cdot 10,5 + 6^2 \cdot 74 + 0,4^2 \cdot 5) \cdot 2}{708}} \doteq 5 Nm \quad (4)$$

$$M_{ekv17} = \sqrt{\frac{(8^2 \cdot 13,5 + 4,5^2 \cdot 81 + 0,4^2 \cdot 3,2 + 5^2 \cdot 12 + 4^2 \cdot 82 + 0,4^2 \cdot 4,2) \cdot 2}{740}} \doteq 3,4 Nm \quad (5)$$

### 3.2. Stanovení parametrů nového motoru

Vypočtené parametry stávajícího motoru pro rychlost 18 km/h (6)

- ekvivalentní moment motoru -  $M_{ekv18}$  5 Nm
- moment motoru maximální -  $M_{max18}$  9,6 Nm
- otáčky motoru, viz. (2) 2634 ot/min

Pro porovnání uvádím parametry motoru pro rychlost RKV 17 km/h (7)

- ekvivalentní moment motoru -  $M_{ekv17}$  3,4 Nm
- moment motoru maximální -  $M_{max17}$  8 Nm
- otáčky motoru 2487 ot/min

Poslední, ale důležitá věc pro návrh motoru v tomto konkrétním případě vyplývá z požadavku pohonu obou náprav. To znamená, že pro pohon RKV budou použity dva stejné motory, dvě stejné převodovky a dva stejné měniče. Případně jeden měnič dvojité. Je tedy nutné vydělit požadované parametry (6) dvěma. Po této úpravě (8) dostaneme konečné požadované minimální parametry jednoho motoru (9).

#### Výpočet požadovaných momentů nového motoru (8)

$$\frac{M_{ekv18}}{2} = M_{nom} = \frac{5}{2} \doteq 2,5 Nm$$

$$\frac{M_{max18}}{2} = M_{max} = \frac{9,6}{2} \doteq 4,8 Nm$$

#### Minimální požadované parametry jednoho motoru (9)

- moment motoru nominální -  $M_n$  2,5 Nm
- moment motoru maximální -  $M_{max}$  4,8 Nm
- otáčky motoru, viz.(2) -  $n$  2634 ot/min
- pracovní režim S1

Výrobci uvádějí výkon motoru jako jeden z hlavních parametrů. Proto jsem provedl jeho výpočet (10), kde  $n$  jsou otáčky motoru pro rychlost 18 km/h. Jelikož však může být tento údaj dosti zavádějící, např. u DC motoru se sériovým buzením je závislost otáček na momentu nelineární, takže pouze z nominálního výkonu a z nominálních otáček nelze jednoznačně stanovit zda-li je motor vyhovující. Současně také proto, že dovolené maximální přetížení, tedy maximální moment je u každého typu motoru jiný, použijeme tento výpočet při výběru nového motoru, spíše pro první přibližnou orientaci v katalozích.

#### Výpočet nominálního a maximálního výkonu jednoho motoru (10)

$$P_{nom} = M_{nom} \cdot \omega_{18} = M_{nom} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 2,5 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 2634}{60} \doteq 745 W$$

$$P_{max} = M_{max} \cdot \omega_{18} = 4,8 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 2634}{60} \doteq 1380 W$$

### 3.3. Výběr motoru

Na základě stanovených parametrů (9),(10), jsem udělal průzkum trhu a našel několik vyhovujících motorů. Bohužel mezi nimi chybí EC a synchronní motory. Největší překážkou u těchto typů motorů byl požadavek napájení 24 V a výkonu 1-1,5 kW. (Nepočítám-li čínské dodavatele, s kterými se mi nepodařilo navázat kontakt.) Měl jsem tedy k dispozici několik komutátorových DC motorů a pouze jeden asynchronní. Nominální parametry některých motorů se vztahovaly ke krátkodobému chodu S2 – 60 min. Bylo tedy potřeba stanovit nové nominální parametry tak, aby jimi mohly být motory zatěžovány nepřetržitě. Toto lze provést přepočtem provozu S2 na provoz S1 dle lit. [2]. K tomu je nutné znát koeficient krátkodobého přetížení motoru  $q_m$  a především oteplovací časovou konstantu motoru  $\tau_r$ . Tato literatura uvádí v jakých mezích se pro různé typy motorů hodnoty  $q_m$  a  $\tau_r$  přibližně pohybují. Pokusil jsem se tedy o výpočet, ale zjistil jsem, že tyto hodnoty je třeba brát pouze pro přibližnou představu. Po dosažení jedné či druhé meze oteplovací časové konstanty daného typu motoru, se výsledky lišily v řádech! Proto jsem kontaktoval výrobce a dodavatele motorů, [3], [7], [11] s dotazem na tento problém. Poslali mi upravené hodnoty motorů pro provoz S1, které jsou uvedeny v **Tab.3**.

	DC motory					AC motory
Označení motoru	P2ZX525	P2ZZ544	130ZYT55	AMK 2630	AMP 4649	G1150400
Typ motoru	PM	PM	PM	Cizí buzení	Sériový	
Napětí [V]	24	24	24	24	24	3x15
Proud [A]	51	75	50		75	65
Výkon [kW]	1	1,5	1	1	1,3	1,3
Otáčky [ot/min]	2800	2700	3000	3000	2800	1800
Moment nominální [Nm]	3,5	5	3,185		4,4	6,9
Maximální moment [Nm]	5,6				10	viz. <b>Tab.P1</b>
Proud při maximálním momentu [A]	78				120	viz. <b>Tab.P1</b>
Účinnost [%]	83,5	83,3	83,3		72,4	viz. <b>Tab.P1</b>
Hmotnost [kg]	11,5	13,5	17	9,5	20	
Krytí	20	20	54	23	23	54
Poznámka	Český výrobce	Český výrobce	Výrobce v USA	Zastoupení v ČR	Zastoupení v ČR	teplotní čidlo, Inkrement.čidlo
Výrobce / dodavatel	ATAS elektromotory Náchod a.s.	ATAS elektromotory Náchod a.s.	Kelly Controls, LLC	Iskra	Iskra	Zapi, zastoupení v ČR
Přibližná cena s DPH za kus	7 500 Kč	9 000Kč	7 800 Kč		14 500 Kč	18 000 Kč

**Tab.3** Přehled nalezených motorů použitelných pro návrh nového pohonu RKV

Další parametry, jako jsou hmotnost a krytí motorů nejsou pro tuto aplikaci až tak důležité. Motory budou uloženy v plechových skříních s krytím IP 65 a nosnost RKV je stanovena s poměrně velkou rezervou.

### 3.4. DC motor

Pro nový DC pohon jsem zvolil motor českého výrobce ATAS elektromotory Náchod a.s. Jedná se o motor s PM, typ P2ZX525. Jeho nominální parametry,  $P_n = 1,1 \text{ kW}$ ,  $I_n = 55 \text{ A}$ ,  $n_n = 2800 \text{ ot/min}$  a  $M_n = 3,75 \text{ Nm}$ , se vztahovaly k provozu S2 = 60 min a byly upraveny pro provoz S1 po konzultaci s výrobcem. Tento motor se mi z pohledu ostatních kritérií, viz. kapitola 2.1., zdál jako nejvhodnější. Navíc ze všech oslovených dodavatelů mi český výrobce poskytl nejpodrobnější informace jak technické, tak co se ceny týče. Dá se tedy předpokládat, že i v budoucnu bude dobrá komunikace v případě reklamace, servisu a podobně.

Pro vybraný motor není potřeba ani měnit typ příruby stávající převodovky, viz. [9] a Obr.P5.

#### Momentová rezerva motoru P2ZX525 (11)

požadovaný moment nominální	2,5Nm		
moment motoru nominální	3,5Nm	při	2790 ot / min
rezerva	40%		
požadovaný moment maximální	4,8Nm		
moment motoru, při kterém RKV			
ještě dosáhne rychlosti 18km / h	5,2Nm	při	2634 ot / min
rezerva	8,3%		
maximální moment motoru, při kterém			
RKV dosáhne rychlosti 17,7km / h	5,6Nm	při	2600 ot / min
rezerva	16,3%		

### 3.5. AC motor

Nalézt vhodný a rozumě dostupný AC motor z nabídky na trhu nebylo jednoduché. Podařilo se mi najít pouze jeden motor, který vyhovuje zadaným požadavkům. Největší problém bylo splnění požadavku, zachování stávajícího nominálního napětí baterie 24 V. Z toho pak vychází hodnota fázového napětí motoru cca 15 V. Další problém, byla velikost požadovaného výkonu. Kdyby mohlo být napětí pohonu vyšší, (48 – 72 V), bylo by možné vybírat z více typů motorů, např. od české firmy ESPO s.r.o. [5]. Tato firma nabízí i výrobu motorů na zakázku. (Bohužel ani po několika násobném pokusu o kontakt, jsem doposud neobdržel žádnou odpověď.)

„Vybral“ jsem motor s typovým označením G1150400, italského výrobce Zapi, který má zastoupení v České republice. Nominální parametry,  $P_n = 1,5 \text{ kW}$ ,  $I_n = 75 \text{ A}$ ,  $n_n = 1800 \text{ ot/min}$  a  $M_n = 8 \text{ Nm}$ , se opět vztahovali k provozu S2 = 60 min. Také v tomto případě mi dodavatel poskytl parametry pro provoz motoru v režimu S1. Ty jsou uvedeny v **Tab.3**. Upravený nominální moment, bylo nutné zredukovat, protože jeho hodnota se vztahuje k otáčkám 1800 ot/min a nominální frekvenci 65 Hz. Redukci momentu jsem provedl podle [1]. Pro výpočet redukovaného momentu (12), bylo potřeba znát frekvenci při které motor dosáhne požadovaných otáček cca 2634 ot/min. Její hodnotu 90 Hz, a také maximální moment jsem odečetl z tabulky **Tab.P1**, poskytnuté výrobcem, takže jej nebylo nutné vypočítat.

#### Redukce nominálního momentu motoru

$$M_{ACred} = M_{ACnom} \cdot \frac{f_{nom}}{f} = 6,9 \cdot \frac{65}{90} \doteq 5 \text{ Nm} \quad (12)$$

#### Momentová rezerva motoru G1150400

(13)

požadovaný moment nominální	2,5Nm		
moment motoru nominální	6,9Nm	při	1800 ot / min
moment motoru nominální redukováný	5Nm	při	2634 ot / min
rezerva	100%		
požadovaný moment maximální	4,8Nm		
moment motoru, při kterém RKV			
ještě dosáhne rychlosti 18km / h	8,9Nm	při	2634 ot / min
rezerva	85%		

#### **4. Návrh měniče pro pohon**

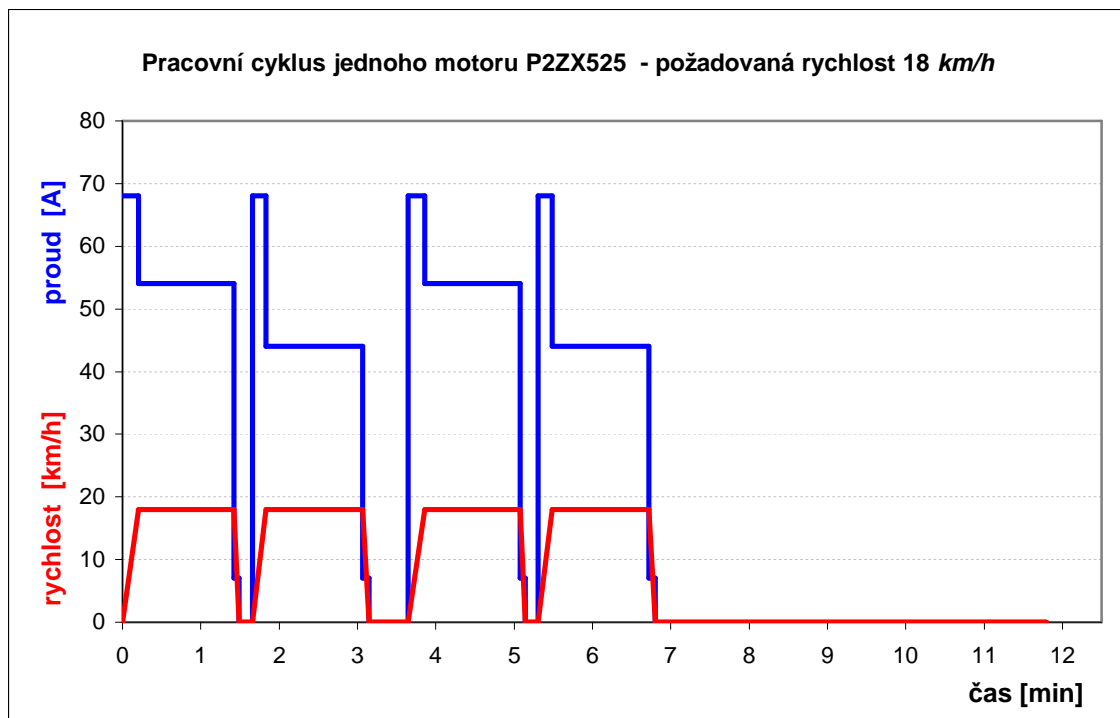
Při návrhu měniče se postupuje podobným způsobem jako při návrhu motoru. Je potřeba znát zatěžovací diagram měniče. Podle literatury [2] je to 5 minutový úsek z největším zatížením, (kdy v měniči vzniknou největší ztráty), s tím rozdílem, že tentokrát potřebujeme znát závislost proudu na čase. Tuto závislost je nutno zkonstruovat na základě pracovního cyklu motoru a ze znalosti jeho parametrů. Přesnější výsledky dostaneme, když veškeré potřebné informace o motoru, především pak závislost proudu na momentu a otáčkách, dodá výrobce v podobě tabulek nebo grafů a není nutné je s menší či větší přesností dopočítat. Ze zatěžovacího diagramu měniče, se vypočte střední a ekvivalentní proud. Pro stanovení parametrů měniče se použije ten proud, který je větší. Samozřejmě je nutné aby v žádném dílčím intervalu zatěžovacího diagramu, nebyl překročen maximální proud udávaný výrobcem měniče. Při konečném stanovení parametrů měniče je vhodné počítat s nějakou rezervou.

#### 4.1. Pracovní cyklus DC měniče

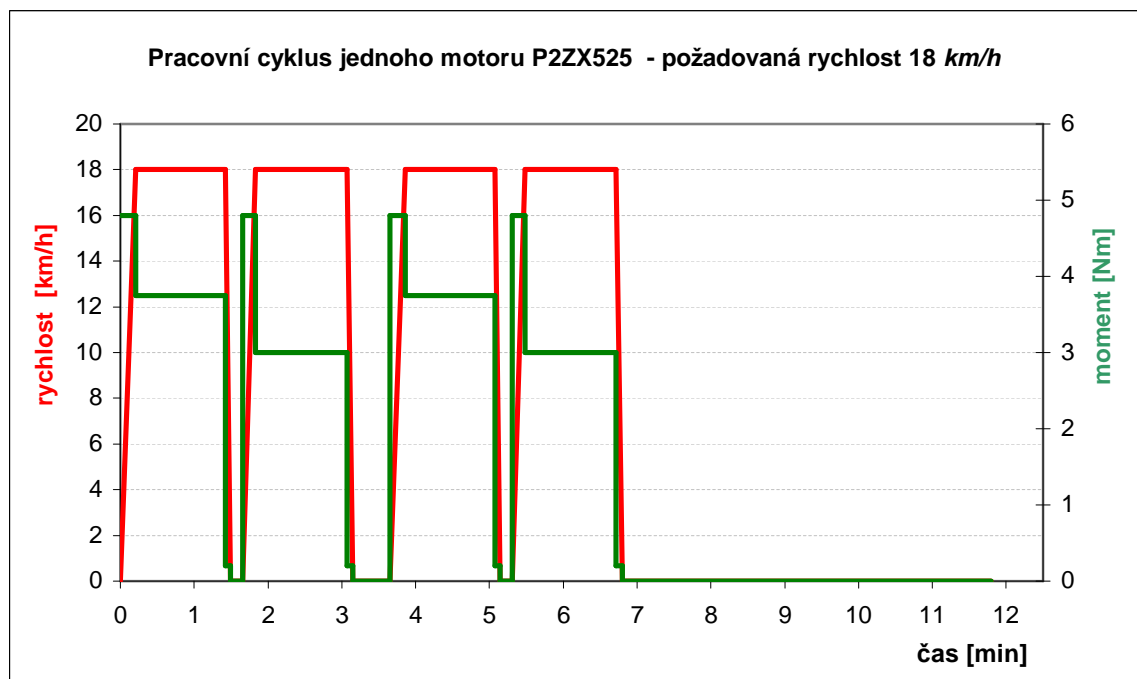
Podle výše uvedeného postupu jsem sestavil tabulku pracovního cyklu jednoho motoru P2ZX525, **Tab.4** a zní pak zkonstruoval průběhy proudů a momentů, viz. **Obr.4** a **Obr.5**. Při pohledu na zatěžovací diagram je výběr úseku pro stanovení parametrů měniče s největším zatížením celkem jednoduchý. Jedná se o prvních 5 minut. Ze stanovených údajů vznikl zatěžovací diagram měniče **Obr.6**. Pak jsem vypočetl ekvivalentní (14) a střední (15) proud měniče.

Pracovní cyklus jednoho DC motoru P2ZX525				
Stav RKV	čas [s]	proud [A]	Rychlost [km/h]	Moment [Nm]
Rozjezd do kopce	12,5	68	0-18	4,8
Jízda do kopce	73	54	18	3,75
Brzdění do kopce	4	7	18-0	0,2
Přestávka	10	0	0	0
Rozjezd z kopce	10,5	68	0-18	4,8
Jízda z kopce	74	44	18	3
Brzdění z kopce	5	7	18-0	0,2
Přestávka	30	0	0	0
Rozjezd do kopce	12,5	68	0-18	4,8
Jízda do kopce	73	54	18	3,75
Brzdění do kopce	4	7	18-0	0,2
Přestávka	10	0	0	0
Rozjezd z kopce	10,5	68	0-18	4,8
Jízda z kopce	74	44	18	3
Brzdění z kopce	5	7	18-0	0,2
Přestávka	300	0	0	0

**Tab.4** Časy a proudy pracovního cyklu jednoho DC motoru P2ZX525 + zatěžovací momenty



**Obr.4** Pracovní cyklus jednoho motoru P2ZX525 – proudové ztížení, pro rychlost 18 km /h



**Obr.5** Pracovní cyklus jednoho motoru P2ZX525 – momentové zatížení, pro rychlost 18 km /h



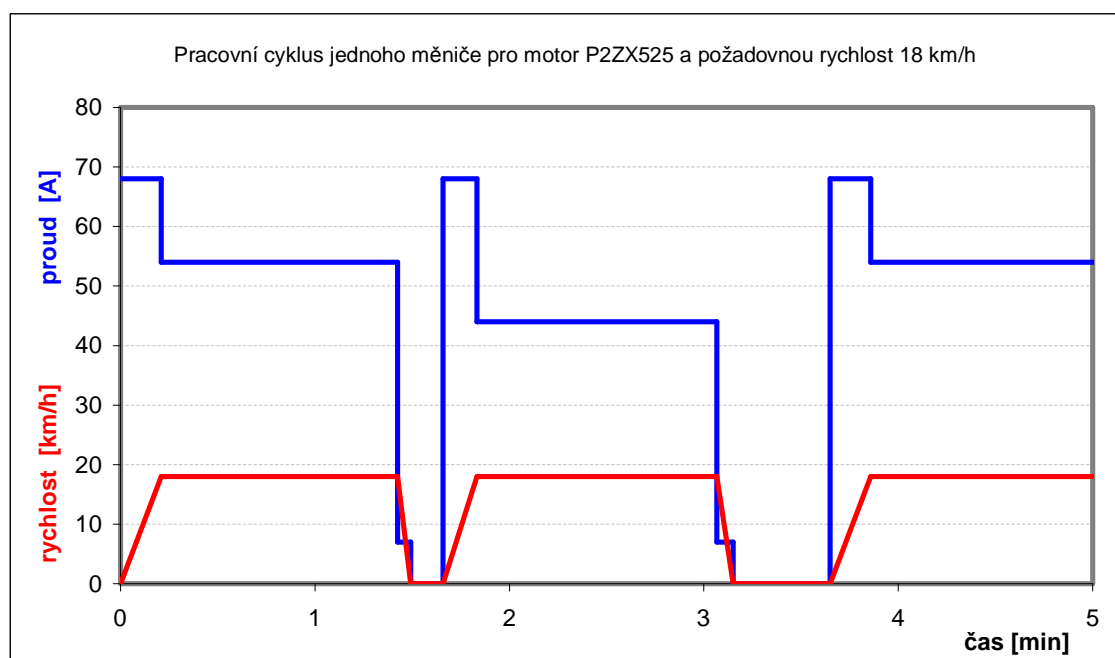
### Výpočet efektivní a střední hodnoty proudu pracovního cyklu DC měniče

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{I_{e1}^2 \cdot \Delta t_1 + I_{e2}^2 \cdot \Delta t_2 + \dots + I_{em}^2 \cdot \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m}}$$

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{(68^2 \cdot 12,5) \cdot 2 + 54^2 \cdot 73 + 7^2 \cdot 4 + 68^2 \cdot 10,5 + 44^2 \cdot 74 + 7^2 \cdot 5 + 54^2 \cdot 69}{300}} \doteq 49 A \quad (14)$$

$$I_{AV} = \frac{I_{e1} \cdot \Delta t_1 + I_{e2} \cdot \Delta t_2 + \dots + I_{em} \cdot \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m}$$

$$I_{AV} = \frac{(68 \cdot 12,5) \cdot 2 + 54 \cdot 73 + 7 \cdot 4 + 68 \cdot 10,5 + 44 \cdot 74 + 7 \cdot 5 + 54 \cdot 69}{300} \doteq 44,7 A \quad (15)$$



**Obr.6** Nejhorší 5 minutový úsek pracovního cyklu měniče, napájecího jeden motor P2ZX525

	DC měniče					AC měniče		
Označení měniče	PMI	RoboteQ	PM24201	SEM-1C	DUAL SEM-0	Curtis 1230	AC-0	AC-1
Model měniče	173201B	AX2550HE		117201A	121201B	2401	152201A	153201A
Napětí baterie nominální [V]	24	12,24,36	24	24	24	24	24	24
Proud trvale [A]	60	2x80	80	75	2x75	70	50	80
Určen pro motor [kW]	do 1,4			0,5-2	0,5-2	1,3	do 1,5	0,7-2,5
Modulační frekvence [kHz]	18	16	16,6	16	16	16	8	8
Rozsah výstupní frek. [Hz]						0-200	0-200	0-200
Rozměry D x Š x V [mm]	210x150x65	228x140x40	198x146x62	245x225x128	245x225x128	164x146x57	180x140x56	210x150x74
Proud maximálním [A]	300/1min	2x140/30sec	200/1min	200/3min	2x200/3min	200/2min	150/1,5min	250/1,5min
Měnič určený pro motor	Motor s permanentními magnety	Motor s permanentními magnety	Motor s permanentními magnety	cize buzený motor	dva samostatné cize buzené motory	asynchronní	asynchronní	asynchronní
Rozsah prac. teplot [°C]	'-30 až +40	'-40 až +80	'-40 až +90	'-30 až +40	'-30 až +40	'-40 až +50	'-30 až +40	'-30 až +40
Krytí IP	54			64	64	53	54	54
Poznámka		Cena včetně dopravy	Cena včetně dopravy		Dvojitý			
Výrobce / dodavatel	Zapi Zastoupení v ČR	RoboteQ Kanada	Kelly Controls, LLC, USA	Zapi Zastoupení v ČR	Zapi Zastoupení v ČR	Curtis USA	Zapi Zastoupení v ČR	Zapi Zastoupení v ČR
Přibližná cena s DPH za kus	15 000 Kč	13 000 Kč	7 000 Kč	?	20 000 Kč	20 000 Kč	10 000 Kč	12 000 Kč

Tab.5 Přehled měničů použitelných pro návrh nového pohonu RKV

## 4.2. Stanovení parametrů DC měniče

Z výpočtu ekvivalentního (14) a středního proudu (15) je jasné, že hodnota trvalého proudového zatížení měniče musí být minimálně 49 A. Maximální proud který musí měnič poskytnout je minimálně 68 A, viz. **Tab.4**.

Ted' zbývá vybrat vhodný měnič. Po průzkumu trhu a výměně několika emailů z dodavateli měničů, jsem vybral nejvhodnější typy viz. **Tab.5**. Všechny typy měničů uvedené v této tabulce mají podobné vlastnosti, jako např. [4], [8], [10] a vyhovují zadaným požadavkům.

Vybral jsem měnič PM24201 s následujícími parametry

(16)

Trvalý proud měniče	80A
Maximální proud měniče	200A/1min

Proudová rezerva DC měniče

(17)

požadovaný proud trvalý	49A
trvalý proud měniče	80A
rezerva	60%
požadovaný proud maximální	68A
trvalý proud měniče	80A
rezerva	18%
požadovaný proud maximální	68A
trvalý proud měniče	200A
rezerva	194%

### 4.3. Pracovní cyklus AC měniče

Stanovení pracovního cyklu je stejné jako u DC měniče. Problém byl v tom, že jsem nemohl odečíst přesné velikosti proudů při potřebných momentech. Měl jsem totiž k dispozici pouze tabulku charakteristických bodů pracovních vlastností daného motoru, viz. **Tab.P1** a nominální parametry motoru, viz. **Tab.3**. Stanovení potřebných proudů jsem provedl výpočtem (18) podle [1]. Protože jsem neznal proudy motoru na prázdno  $I_0$  ani momentotvorný proud  $I_q$ , pomocí dvou rovnic o dvou neznámých (19) jsem vypočetl „pomocné“ hodnoty  $I_q$  a  $I_0$ , které se vztahují ke známým hodnotám proudů  $I_1$  a  $I_2$ , momentů  $M_1$  a  $M_2$ , viz. **Tab.P1** a frekvenci 90 Hz, při které motor poskytuje požadované otáčky. Hodnoty  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $M_1$  a  $M_2$  jsou velice blízké momentům pracovního cyklu motoru. Tedy těm které nás zajímají. Z toho usuzuji, že následující výpočty (19), (21), (22), (24), jsou pro návrh AC měniče dostatečně přesné, (použitelné).

#### Výpočet potřebných hodnot proudů AC motoru

$$I_{MP} = \sqrt{I_0^2 + I_q^2 \cdot \left( \frac{M_{PM}}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2} \quad (18)$$

#### Soustava dvou rovnic s vyjádřením dvou neznámých $I_q$ a $I_0$

$$\begin{aligned} I_1 &= \sqrt{I_0^2 + I_q^2 \cdot \left( \frac{M_1}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2} & \Rightarrow & I_0 = \sqrt{I_1^2 - I_q^2 \cdot \left( \frac{M_1}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2} \\ I_2 &= \sqrt{I_0^2 + I_q^2 \cdot \left( \frac{M_2}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2} & \Rightarrow & I_q = \frac{\sqrt{I_2^2 - I_0^2}}{\sqrt{\left( \frac{M_2}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2}} \end{aligned} \quad (19)$$

#### Činitel „odbuzení“ motoru

$$k_f = \frac{f_N}{f} = \frac{65}{90,1} = \frac{650}{901} \quad \text{respektive} \quad \frac{65}{90,2} = \frac{650}{902} \quad (20)$$

Vstupní hodnoty pro konkrétní výpočty potřebných proudů vypsané z **Tab.P1**

$f$	90,1 Hz respektive 90,2 Hz
$I_1$	44,1 A
$I_2$	60,6 A
$M_1$	3,7 Nm
$M_2$	5,3 Nm
$M_{nom}$	6,9 Nm
$k_f$	$\frac{650}{901}$ respektive $\frac{650}{902}$

Výpočet proudu  $I_q$

$$I_q = \frac{\sqrt{I_2^2 - I_0^2}}{\sqrt{\left(\frac{M_2}{M_{nom} \cdot k_f}\right)^2}} = \frac{\sqrt{I_2^2 - \left(I_1^2 - I_q^2 \cdot \left(\frac{M_1}{M_{nom} \cdot k_f}\right)^2\right)}}{\sqrt{\left(\frac{M_2}{M_N \cdot k_f}\right)^2}} \Rightarrow \quad (21)$$

$$I_q = \sqrt{-\left[\left(\frac{M_{nom} \cdot k_f}{M_1}\right)^2\right] \cdot \frac{-(I_2^2) + I_1^2}{-(M_1^2) + M_2^2}} = \sqrt{-\left[\left(6,9 \cdot \frac{650}{901}\right)^2\right] \cdot \frac{-(60,6^2) + 44,1^2}{-(3,7^2) + 5,3^2}} = 54,5 A$$

Dosazení  $I_q$  do první rovnice a výpočet  $I_0$

$$I_0 = \sqrt{I_1^2 - I_q^2 \cdot \left(\frac{M_1}{M_{nom} \cdot k_f}\right)^2} = \sqrt{44,1^2 - 54,5^2 \cdot \left(\frac{3,7}{6,9 \cdot \frac{650}{901}}\right)^2} = 17,4 A \quad (22)$$

Zkouška-výpočet  $I_L$  podle  $I_q$  a  $I_0$

(23)

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_q^2 \cdot \left( \frac{M_1}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2} = \sqrt{17,4^2 + 54,5^2 \cdot \left( \frac{3,7}{6,9 \cdot \frac{650}{901}} \right)^2} = 44,088 A \doteq 44,1 A \Rightarrow OK$$

Výpočtem (23) jsem ověřil správnost postupu.

Výpočet proudů  $I_{PMxx}$  pro momenty  $M_{PMxx}$  pracovního cyklu motoru

V celém pracovním cyklu motoru se vyskytují pouze čtyři hodnoty momentů. Jsou to: 4.8 Nm, 3.75 Nm, 3 Nm a 0.2 Nm. Pro ty jsem vypočetl hodnoty proudů motoru  $I_{PM}$ , označených indexem požadovaného momentu.

(24)

$$I_{PM4,8} = \sqrt{I_0^2 + I_q^2 \cdot \left( \frac{M_{PM4,8}}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2} = \sqrt{17,4^2 + 54,5^2 \cdot \left( \frac{4,8}{6,9 \cdot \frac{650}{901}} \right)^2} \doteq 55,4 A$$

$$I_{PM3,75} = \sqrt{I_0^2 + I_q^2 \cdot \left( \frac{M_{PM3,75}}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2} = \sqrt{17,4^2 + 54,5^2 \cdot \left( \frac{3,75}{6,9 \cdot \frac{650}{901}} \right)^2} \doteq 44,6 A$$

$$I_{PM3} = \sqrt{I_0^2 + I_q^2 \cdot \left( \frac{M_{PM3}}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2} = \sqrt{17,4^2 + 54,5^2 \cdot \left( \frac{3}{6,9 \cdot \frac{650}{901}} \right)^2} \doteq 37,2 A$$

$$I_{PM0,2} = \sqrt{I_0^2 + I_q^2 \cdot \left( \frac{M_{PM0,2}}{M_{nom} \cdot k_f} \right)^2} = \sqrt{17,4^2 + 54,5^2 \cdot \left( \frac{0,2}{6,9 \cdot \frac{650}{901}} \right)^2} \doteq 17,5 A$$

Graf pracovního cyklu AC měnič vypadá stejně jako DC měniče. Tedy i hodnoty časů jsou stejné. Rozdíl je pouze v hodnotách proudů motorem, viz. výpočet (24). Z těchto hodnot jsem opět vypočetl ekvivalentní (25) a střední (26) proud AC měniče.

#### Výpočet efektivní a střední hodnoty proudu pracovního cyklu AC měniče

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot \Delta t_1 + I_2^2 \cdot \Delta t_2 + \dots + I_m^2 \cdot \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m}} \quad (25)$$

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{(55,4^2 \cdot 12,5) \cdot 2 + 44,6^2 \cdot 73 + 17,5^2 \cdot 4 + 55,4^2 \cdot 10,5 + 37,2^2 \cdot 74 + 17,5^2 \cdot 5 + 44,6^2 \cdot 69}{300}} \doteq 40,6A$$

$$I_{AV} = \frac{I_{e1} \cdot \Delta t_1 + I_{e2} \cdot \Delta t_2 + \dots + I_{em} \cdot \Delta t_m}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_m} \quad (26)$$

$$I_{AV} = \frac{(55,4 \cdot 12,5) \cdot 2 + 44,6 \cdot 73 + 17,5 \cdot 4 + 55,4 \cdot 10,5 + 37,2 \cdot 74 + 17,5 \cdot 5 + 44,6 \cdot 69}{300} \doteq 37,2A$$

#### **4.4. Stanovení parametrů AC měniče**

Stejně jako u DC měniče je zde větší hodnota u výpočtu ekvivalentního proudu (25). Tedy minimální trvalý proud měniče musí být cca 41 A, maximální proud pak cca 56 A. Opět po průzkumu trhu jsem našel několik typů měničů. Tři nejvhodnější jsou uvedeny v **Tab.5**. Všechny typy pracují s pulzní šířkovou modulací, mají podobné vlastnosti viz. [4], [6], **Tab.P2** a vyhovují zadaným požadavkům. Vzhledem k ceně a dostupnosti byl výběr měniče jednoznačný.

Vybral jsem měnič AC-0 s následujícími parametry

(27)

Trvalý proud měniče	50A
Maximální proud měniče	150A/1,5min

Proudová rezerva AC měniče

(28)

požadovaný proud trvalý	41A
trvalý proud měniče	50A
rezerva	22%
požadovaný proud maximální	56A
maximální proud měniče	150A
rezerva	168%

## 5. Zhodnocení variant pohonu kolejového vozidla

Při hodnocení navržených variant DC a AC pohonu, bychom měli především vycházet ze zadaných požadavků na provoz, viz. kapitola 1.4. Fakt je ten, že všechny tyto požadavky byly již splněny v průběhu jednotlivých návrhů motorů a měničů. Dále zde budou hodnoceny pouze konkrétně navržené varianty, i když z **Tab.3** a **Tab.5** jsou s největší pravděpodobností použitelné i ostatní vhodné kombinace. Např. DC motor s cizím buzením + příslušný měnič.

Nyní můžeme porovnat výhody a nevýhody jednotlivých variant. Zajímavé výsledky můžeme dostat při srovnání z hlediska dostupnosti navrhovaných komponentů, z hlediska účinnosti pohonu, z hlediska dodatečných možností pohonu, případně z hlediska výkonové rezervy. Dále pak z hlediska možných komplikací při realizaci a provozu pohonu a také z hlediska předpokládané spolehlivosti a životnosti, nabídky komponent pro jednotlivé varianty. Jedno z nejzajímavějších hledisek bude srovnání pořizovací ceny. Nabízí se také dílčí srovnání stávajícího a navrženého pohonu.



### 5.1. Cena navrženého DC a AC pohonu

Všechny uvedené ceny jsou přibližné, ale od skutečnosti by se neměly lišit více jak o 10 - 15%. Pro úplnost uvádím, že ceny některých motorů a měničů jsem přepočítal z cen zjištěných na internetových stránkách dodavatelů, uvedených v dolarech, podle současného kurzu cca 19 Kč za 1\$. Do těchto cen jsem započítal i daň a cenu poštovního [12], která je dosti závislá na hmotnosti. U všech komponentů uvedených v **Tab.3** a **Tab.5**, jsem si emailovým dotazem u dodavatele ověřil, že není problém z jejich zasláním do České Republiky. Cena stávající převodovky, pro kterou se hodí oba typy navržených motorů a to bez jakýchkoliv dalších úprav, je cca 4 000 Kč.

#### Výpočet přibližné ceny navrženého DC a AC pohonu

$$\begin{aligned} & 2 \cdot \text{cena motoru} + 2 \cdot \text{cena měniče} + 2 \cdot \text{cena převodovky} \\ \text{Cena DC pohonu :} & \quad 2 \cdot 7500 + 2 \cdot 7000 + 2 \cdot 4000 = 37\,000 \text{ Kč} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\text{Cena AC pohonu :} \quad 2 \cdot 18000 + 2 \cdot 10000 + 2 \cdot 4000 = 64\,000 \text{ Kč} \quad (30)$$

#### Výpočet přibližné celkové účinnosti DC, AC a stávajícího pohonu

Kromě základních účinností převodovky a motoru by měla být ve výpočtu zahrnuta také účinnost měniče, ložisek, kol, spojení motoru s převodovkou apod. Tyto účinnosti neznám. Nicméně, pro porovnání „celkové“ účinnosti pohonu je nejdůležitější účinnost motoru. Pro „ostatní“ účinnosti jsem stanovil hodnotu odhadem 90%. U výpočtu stávající účinnosti pohonu (33), není druhá mocnina, protože RKV má pouze jeden pohon, (jednu hnanou nápravu).

$$\begin{aligned} & (\text{účinnost převodovky} \times \text{účinnost motoru} \times \text{ostatní účinnosti})^2 \\ \text{Účinnost DC pohonu :} & \quad (0,88 \cdot 0,84 \cdot 0,9)^2 = (0,665)^2 = 0,446 \rightarrow 44,6\% \end{aligned} \quad (31)$$

$$\text{Účinnost AC pohonu :} \quad (0,88 \cdot 0,95 \cdot 0,9)^2 = (0,752)^2 = 0,566 \rightarrow 56,6\% \quad (32)$$

$$\text{Účinnost stávajícího pohonu :} \quad 0,88 \cdot 0,625 \cdot 0,9 = 0,495 \rightarrow 49,5\% \quad (33)$$

## 5.2. Zhodnocení: DC pohon versus AC pohon

Nebudu zde vypisovat obecně známé výhody a nevýhody těchto systémů. To je možno dohledat např. v literatuře [1], [2]. Jde o to jaké výhody či nevýhody přináší návrh DC respektive AC pohonu v této konkrétní aplikaci.

### DC pohon

Mezi hlavní a podle požadavků velice důležitou výhodou navrženého DC pohonu je jeho cena. Další výhodu vidím v českém dodavateli a zároveň výrobcí motoru. Ať už z pohledu dostupnosti, komunikace, servisu či reklamace. Měnič DC pohonu má relativně velkou proudovou rezervu, což mírně snižuje jeho požadavky na chlazení. Nastavení parametrů měniče, se provádí přes sériovou linku RS232 pomocí speciálního SW, který je na stránkách dodavatele dostupný zdarma [8]. Další výhoda DC motoru s PM je ta, že se dá motor použít jako nouzová brzda, která nepotřebuje další napájení. Při vhodném zapojení výkonového rozpínacího stykače se při poruše, přeruší jeho napájení, zkratují kontakty motoru což vyvolá silný brzdný účinek. V takovém případě by se mohlo ušetřit za finančně nákladnou elektromechanickou brzdou. Velikost brzdného momentu závisí na rychlosti otáčení motoru. (Při velmi nízkých otáčkách je brzdný moment téměř nulový, takže se nedá použít jako parkovací brzda).

Z pohledu dodatečných „komplikačí“ je u DC pohonu potřeba doplnit snímače otáček, případně teplotního čidla. Kromě ceny nákupu materiálu se bude řešit umístění, uchycení a podobně. Náklady na vyřešení tohoto problému se dle mého předpokladu budou pohybovat v řádu několika tisíc. I přes tuto investici myslím, že cena pohonu bude oproti AC variantě stále výrazně nižší. Samozřejmě, že přítomnost komutátoru patří mezi hlavní nevýhody. Kromě jiného vytváří i vysokofrekvenční rušení, což zvyšuje náročnost na odolnost řídicího systému, RDS, případně použití stíněných vodičů ve větší míře a výraznější polohové oddělení silové kabeláže. Účinnost motoru cca 84%, spolehlivost a životnost jsou v porovnání z AC variantou horší. Menší nevýhoda je, že měnič je nutné objednat ze Spojených států Amerických, kde je pouze jednoletá záruka na zboží. Navíc případná reklamace jednoho kusu se vzhledem k pořizovací ceně a nákladům na dopravu téměř nevyplatí.

## AC pohon

Většina výhod a nevýhod se dá vytušit z výše uvedeného zhodnocení DC pohonu. Největší nevýhoda je jeho pořizovací cena. Myslím, že ta bude pro konečný výběr pohonu RKV rozhodující. Menší nevýhoda, zvláště pro testovací účely jednoho kusu RKV, navrženého AC měniče je, že pro své nastavení potřebuje speciální programovací konzolu nebo SW, který je cenově srovnatelný s cenou měniče. (Ověřeno dotazem u dodavatele [11]) Ovšem v případě výroby již několika kusů se tato nevýhoda zdá v podstatě bezvýznamnou.

Dále následují už jen výhody. Především čidlo otáček a teploty je přímo součástí motoru. Také účinnost motoru přibližně 95%, **Tab.P1**, hraje ve prospěch AC pohonu. Při požadavku dvou pohonů na jeden RKV, je 12% rozdíl v celkové účinnosti AC oproti DC pohonu, viz. (31), (32).

### **5.3. Celkové zhodnocení**

Protože se principiálně jedná o rozdílné systémy, není možné plnohodnotné srovnání stávajícího a nově navržených pohonů. Něco však porovnat můžeme. Tak třeba srovnání přibližné celkové účinnosti všech tří systémů, viz. (31), (32), (33). Přesto, že účinnost stávajícího motoru je o 21,5% menší než účinnost navrženého DC motoru, je přibližná celková účinnost stávajícího pohonu o bez mála 5% větší než u nového návrhu DC pohonu. AC pohon s výbornou účinností motoru cca 95% , je pouze o 7% lepší. V absolutních číslech je přibližná celková účinnost relativně špatná. Při provozu RKV, s jednou ze tří zmíněných variant, se v průměru téměř 50% elektrické energie přemění na neužitečné teplo. Což obecně u bateriového zařízení není moc příznivá energetická bilance.

Dále jsem si uvědomil, že použitá převodovka má maximální vstupní výkon 2,3 kW. Maximální vstupní výkon stávajícího motoru,  $P_{\maxst.Mot}$  motoru, vypočtený (34) z maximálního potřebného momentu,  $M_{\maxst.Mot} = 9,6 \text{ Nm}$  a otáček  $n_{18} = 2634 \text{ ot/min}$ , je 2648 W, tedy o 15% větší, což jistě zkrátí životnost převodovky.

$$P_{\max st. Mot} = M_{\max st. Mot} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{18}}{60} = 9,6 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 2634}{60} \doteq 2648W \Rightarrow \text{přetížení převodovky cca 15\%}$$

Při pohledu na zatěžovací diagram RKV, **Obr.2** a na velikosti proudů a časů, si myslím, že požadavek rekuperačního brzdění není opodstatněný, takto získaná energie představuje pouze velice malý zlomek energie vydané. Na druhou stranu tento „problém“ úzce souvisí s požadavkem regulace maximální rychlosti, (možností jejího ovlivnění). Kdy ze splnění tohoto požadavku následně vyplývá také možnost rekuperačního brzdění. Protože se nejedná o dynamicky náročný pohon s častou reverzací, mohl by se pro napájení DC motoru použít dvou kvadrantový měnič a dva výkonové stykače. Snížily by se tak ztráty na polovodičích a možná i celkové náklady. (Tuto verzi řešení, jsem při návrhu pohonu bral také v potaz, ale v nabídce na trhu jsem nenašel vhodný dvou kvadrantový měnič.)

Obě navržené varianty DC a AC pohonu, vyhovují všem zadaným požadavkům. Z pohledu určení a předpokládaného vytížení RKV, v průměru maximálně cca 30 hodin měsíčně, si myslím, že by výhody AC pohonu nebyli až tak využity a vzhledem k ceně bych pro tuto aplikaci, při rozhodování mezi navrženým DC a AC pohonem, volil DC variantu.

## 6. Závěr

Cílem mé bakalářské práce byl návrh nového pohonu kolejového vozidla. Měl jsem zanalyzovat stávající stav zařízení, navrhnout vhodný motor a k němu vhodný měnič. Poslední úkol v této práci, byl zhodnotit varianty pohonu. Myslím, že jsem tento úkol splnil.

Po analýze stávajícího stavu, z naměřených hodnot, z upřesněných informací od potencionálního zákazníka a z praktických zkušeností ze zkušebního provozu RKV vznikly požadavky, ze kterých jsem dále vycházel. Prvním důležitým bodem, bylo zkonstruování pracovního cyklu stávajícího motoru, na kterém je celý návrh pohonu založen

Z původního záměru, navrhnout jak DC pohon s komutátorovým a EC motorem, tak AC pohon se synchronním a asynchronním motorem, jsem musel upustit. Po prvotním průzkumu trhu jsem v podstatě nenašel synchronní ani EC motor s požadovanými parametry. Nepočítám-li čínské dodavatele, kteří mi bohužel neodpověděli ani na jeden z mých dotazů. Kupodivu, s měniči k těmto motorům nebyl až takový problém, např. viz. [8], [10]. Největší překážkou u motoru byl požadavek napájení 24 V a výkonu 1-1,5 kW. Z těchto důvodů jsem se dál tímto problémem nezabýval. Ovšem ani při hledání asynchronního motoru nebyla nabídka trhu příliš pestrá. Našel jsem pouze jeden motor s požadovanými parametry.

V konečném výsledku jsem navrhl jeden DC pohon s komutátorovým motorem a s PM a jeden AC pohon s asynchronním motorem. Po zhodnocení obou variant, jsem došel k závěru, že pro některé aplikace je cenově, ale i z pohledu dostupnosti komponentů, výhodnější použít „klasický“ DC pohon i přestože se AC pohony prosazují ve stále větší míře.

Z pohledu ceny, jednoduchosti a teoretické účinnosti kompletního pohonu RKV, by rozhodně stálo za úvahu, změnit celkovou koncepci pohonu, např. použitím jednostupňové řetězové převodovky, (dosahující účinnosti až 98%) nebo ještě lépe převodovku z pohonu zcela vypustit. Také zmenšení průměru kol by tomuto řešení prospělo. Takový pohon by snad bylo možné vyřešit s použitím více pólových motorů. (menší otáčky, větší moment). Pokud by se k tomu zvýšilo nominální napětí pohonu, např. na 48 V, výrazněji by se rozšířila nabídka AC motorů. Např. [5] Reálně se mi také jeví představa, vyřešit požadavek náhonu na obě nápravy jedním silnějším pohonem a řetězovým propojením obou náprav. Výše naznačená řešení pohonu vidím jako další možné pokračování projektu RKV.

## 7. Literatura

- [1] FLAJTINGR, J. – KULE, L.: *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*. Západočeská univerzita v Plzni, 2002, 142 stran. ISBN 80-7082-919-2.
- [2] NEBORÁK, I. – SLÁDEČEK, V.: *Elektrické pohony, pro kombinované a distanční studium*. VŠB - TU Ostrava, 2008
- [3] ATAS elektromotory Náchod a.s.: *Komutátorové motory s permanentními magnety* [online]. [cit. 2010-02-10]. Dostupné z: <http://www.atas.cz/files/P2X.pdf>
- [4] Electrofit Zapi Ltd.: *Electrofit Zapi's website* [online]. [cit. 2010-05-03]. Dostupné z: <http://www.electrofit-zapi.com/index.htm>
- [5] ESPO s.r.o.: *Motory napájené z baterií* [online]. [cit. 2010-05-03]. Dostupné z: [http://www.esporoznov.cz/html\\_cz/bater.htm](http://www.esporoznov.cz/html_cz/bater.htm)
- [6] GLOBAL INDUSTRIAL PRODUCTS, INC.: *AC Motor Controllers* [online]. [cit. 2010-03-05]. Dostupné z: <http://www.globalepower.com/AC-MotorControllers.htm>
- [7] Iskra Avtoelektrika d.d.: *Commercial catalogue* [online]. [cit. 2010-03-13]. Dostupné z: [http://www.iskra-ae.com/alba\\_cat/php/kframe.php?lang=E](http://www.iskra-ae.com/alba_cat/php/kframe.php?lang=E)
- [8] Kelly Controls, LLC.: *Support* [online]. [cit. 2010-05-03]. Dostupné z: <http://www.kellycontroller.com/support.php>
- [9] MOTOR-GEAR a.s.: *Šnekové převodovky Řada XA, XC, XF* [online]. [cit. 2010-03-05]. Dostupné z: <http://www.motorgear.cz/prevodovky-snekove-xa-xc-xf>
- [10] RoboteQ: *AX2550 / AX2850 - Dual 120A, Brushed DC Motor Controller* [online]. [cit. 2010-05-03]. Dostupné z: <http://www.roboteq.com/brushed-dc-motor-controllers/ax2550-ax2850-dual-120a-brushed-dc-motor-controller.html>
- [11] UHS JAKOS a.s.: *Elektronické regulátory otáček Zapi* [online]. [cit. 2010-05-03]. Dostupné z: <http://www.zapiservice.cz/index.htm>
- [12] www.USASERVIS.cz: *Ceník poštovního z USA* [online]. [cit. 2010-05-03]. Dostupné z: <http://www.usaservis.cz/cenik-posty-z-usa.html>

## 8. Seznam příloh

### Tabulky

<b>Tab.P1</b>	<i>Charakteristické body provozních vlastností motoru G1150400</i>	1
<b>Tab.P2</b>	<i>Některá technická data měniče AC-0</i>	2
<b>Tab.P3</b>	<i>Parametry použité převodovky</i>	3

### Obrázky

<b>Obr.P1</b>	<i>Provozní charakteristiky motoru AMP4649</i>	3
<b>Obr.P2</b>	<i>Závislost proudu a účinnosti motoru P2ZX525 na momentu</i>	4
<b>Obr.P3</b>	<i>Závislost otáček a výkonu motoru P2ZX525 na momentu</i>	4
<b>Obr.P4</b>	<i>Rozměry motoru P2ZZ544</i>	5
<b>Obr.P5</b>	<i>Rozměry motoru P2ZX525</i>	6
<b>Obr.P6</b>	<i>Rozměry motoru AMP4649</i>	6
<b>Obr.P7</b>	<i>Mechanické rozměry motoru G1150400</i>	7

## Přílohy


FSAT	FREQ	SLIP	Giri	C	V	IBATT	IMOT	P.R	P.Batt	Rend	S2	S3
Hz	Hz	Hz	Rpm	Kgm	Volt	Amp	Amp	KW	KW	%	min	%
40	30,3	2,0	851	1,07	24,1	64,0	100,8	0,93	1,54	60,5	29,1	43,4
40	30,3	2,9	822	1,46	24,3	80,6	108,9	1,23	1,96	62,7	25,1	38,9
40	30,2	4,0	788	1,85	24,2	102,1	125,1	1,50	2,47	60,5	18,6	30,7
40	30,3	5,1	757	2,06	24,3	114,8	138,4	1,60	2,80	57,3	14,4	24,7
40	30,3	7,1	697	1,96	25,9	143,6	151,2	1,41	3,72	37,8	11,0	19,5
40	30,3	7,9	670	2,51	24,4	156,3	175,9	1,73	3,82	45,3	5,9	10,7
40	40,1	1,7	1154	1,12	24,3	82,6	106,1	1,32	2,00	65,9	26,4	40,4
40	40,2	4,0	1085	2,17	23,8	150,2	141,3	2,42	3,58	67,6	13,6	23,5
40	40,2	8,3	955	2,93	24,3	253,8	213,3	2,87	6,16	46,6	1,1	2,0
40	40,2	5,0	1055	2,35	24,2	163,2	149,2	2,54	3,95	64,4	11,5	20,3
40	40,2	5,9	1028	2,61	24,3	186,4	169,0	2,75	4,53	60,8	7,2	13,0
40	40,2	8,2	961	2,86	23,5	223,0	202,4	2,82	5,23	53,9	1,7	2,8
40	50,2	1,1	1473	0,50	24,3	41,0	63,2	0,75	1,00	75,6	59,8	69,8
40	50,2	2,6	1429	1,05	24,1	80,6	82,9	1,54	1,95	78,9	40,4	54,8
40	50,2	4,5	1371	1,57	24,3	124,3	116,1	2,21	3,02	73,1	22,0	35,1
40	50,2	6,5	1312	1,92	24,2	160,0	145,8	2,59	3,87	66,9	12,4	21,6
40	50,2	7,3	1287	2,02	24,4	171,7	157,7	2,68	4,19	63,8	9,5	17,0
40	50,2	8,7	1246	2,14	24,0	191,7	175,8	2,74	4,60	59,5	5,9	10,8
40	60,1	1,5	1760	0,49	24,2	42,5	53,0	0,89	1,03	86,5	74,8	79,0
40	60,1	3,9	1688	1,05	24,3	91,3	87,8	1,83	2,22	82,4	36,9	51,5
40	60,1	6,6	1605	1,48	23,9	139,7	125,7	2,44	3,34	72,8	18,4	30,4
40	60,1	9,7	1513	1,74	24,0	180,7	162,2	2,70	4,34	62,2	8,5	15,4
40	70,2	1,5	2061	0,39	24,3	35,7	44,6	0,83	0,87	95,6	91,9	87,3
40	70,2	2,8	2022	0,63	24,1	59,3	61,3	1,31	1,43	91,4	62,2	71,4
40	70,2	5,4	1944	1,01	24,2	102,8	95,8	2,02	2,49	81,2	31,9	46,4
40	70,2	9,5	1820	1,38	24,1	153,6	140,4	2,57	3,71	69,3	13,9	23,9
40	80,1	1,5	2358	0,34	24,2	33,7	40,7	0,81	0,82	99,8	101,9	91,5
40	80,1	3,0	2314	0,53	24,1	54,5	55,4	1,25	1,32	95,4	70,8	76,7
40	80,1	4,7	2261	0,75	24,3	81,6	78,3	1,75	1,98	88,2	44,1	58,0
40	80,2	7,1	2192	0,96	24,3	110,6	102,6	2,17	2,69	80,8	28,1	42,4
40	80,1	9,5	2118	1,13	24,2	137,3	126,3	2,46	3,32	73,9	18,2	30,1
40	80,1	11,5	2057	1,20	24,3	152,4	143,3	2,54	3,70	68,7	13,1	22,6
40	90,1	2,4	2633	0,37	24,1	41,8	44,1	0,99	1,01	98,6	93,1	87,9
40	90,2	3,9	2587	0,53	24,2	61,8	60,6	1,42	1,50	94,8	63,1	72,0
40	90,2	6,7	2505	0,75	24,3	93,8	87,0	1,94	2,28	84,8	37,5	52,0
40	90,2	9,0	2436	0,91	24,2	118,0	108,5	2,28	2,86	79,7	25,3	39,1
40	90,2	11,9	2350	1,01	24,3	144,1	133,1	2,44	3,50	69,8	16,0	27,0
40	100,2	4,1	2884	0,45	24,1	57,4	55,9	1,34	1,39	96,7	70,0	76,2
40	100,2	7,6	2780	0,71	24,2	96,7	88,6	2,03	2,34	86,7	36,4	51,0
40	100,2	12,4	2636	0,89	24,1	132,4	123,7	2,41	3,20	75,4	19,1	31,3
40	120,1	6,7	3404	0,49	24,2	72,8	68,5	1,70	1,76	96,4	53,5	65,5
40	120,2	8,9	3338	0,57	24,3	89,9	83,6	1,97	2,18	90,3	39,9	54,3
40	120,1	10,6	3285	0,63	24,3	103,3	95,0	2,13	2,51	84,7	32,3	46,9

**Tab.P1** Charakteristické body provozních vlastností motoru G1150400

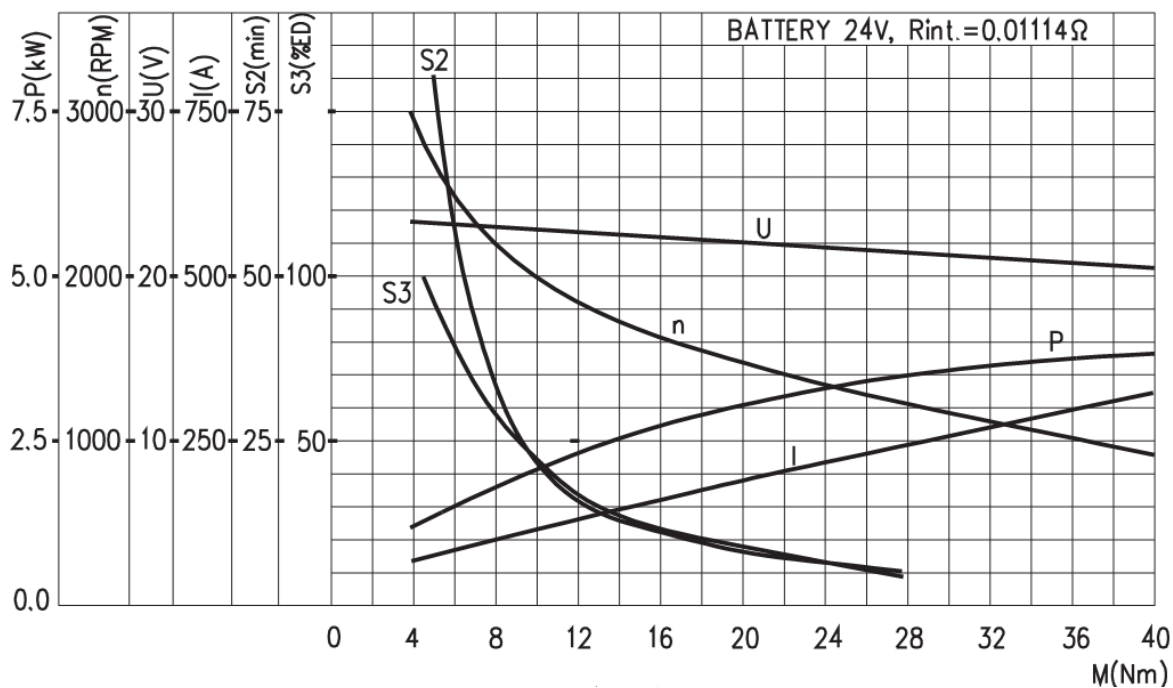


Technická data:	
Funkce rekuperačního brzdění.	
Napětí	24 – 36 – 48V
Výkon motoru	0,7 – 2,5 kW
Max. proud	250 A/ 1,5 min
Zesilovač	10% z maximálního proudu na několik vteřin
Frekvence	8 kHz
Venkovní teplota	-30° ... +40°
Maximální teplota měniče (při plném výkonu)	75 °C
Další technické vlastnosti:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ absolutní proporcionální jízdní vlastnosti</li> <li>▪ automatické řízení otáček s rekuperačním elektrickým brzděním při minimální změně napětí</li> <li>▪ snímání otáček (zpětná vazba)</li> <li>▪ datová sběrnice CAN</li> <li>▪ řízení mikroprocesorem</li> <li>▪ programovatelný přes sériovou linku (programovací konzola, PC)</li> <li>▪ interní počítadlo provozních hodin</li> <li>▪ monitorování teploty + teplotní ochrana</li> <li>▪ ukládání poruch do paměti (diagnostika pomocí LED, programovací konzoly nebo PC)</li> <li>▪ odpovídá evropské bezpečnostní normě EN 1175</li> <li>▪ IP54</li> </ul>	
Přehled základních nastavení:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ maximální proud</li> <li>▪ brzdící intenzita při částečném uvolnění akcelérátoru</li> <li>▪ brzdící intenzita při návratu akcelérátoru do nulové polohy</li> <li>▪ brzdící intenzita při změně směru jízdy</li> <li>▪ brzdící intenzita při aktivaci redukce rychlosti</li> <li>▪ maximální rychlost vpřed</li> <li>▪ maximální rychlost vzad</li> <li>▪ a další</li> </ul>	

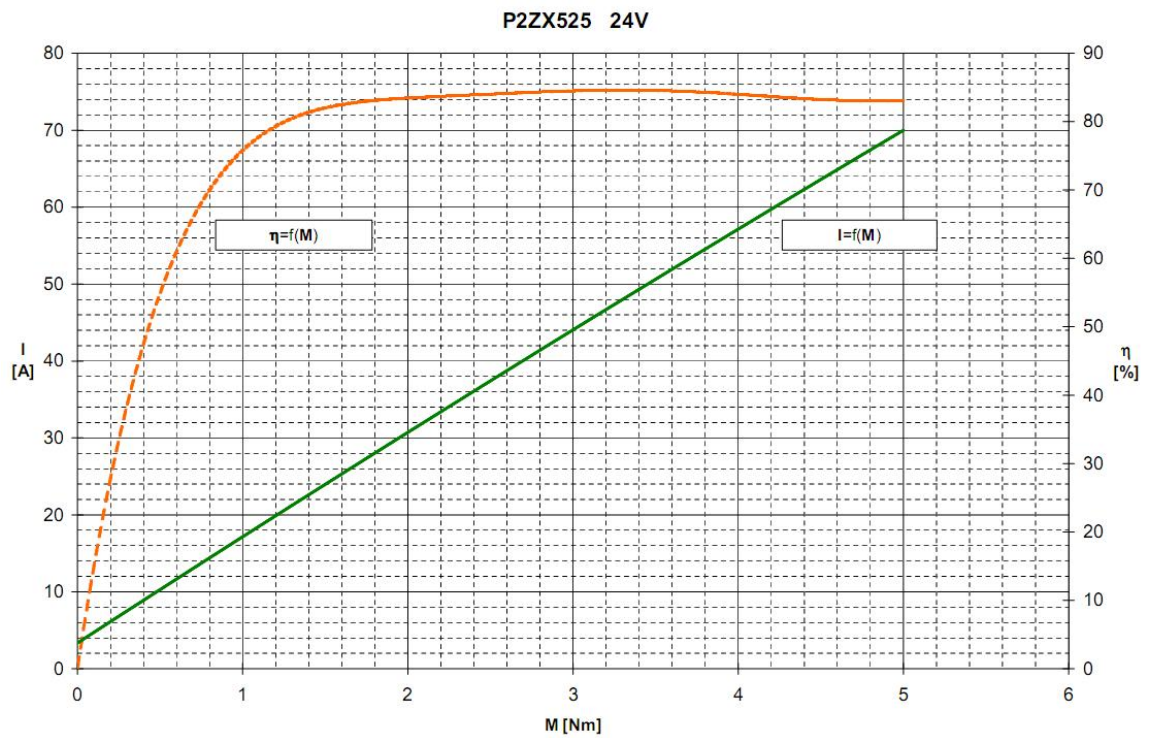
**Tab.P2** Některá technická data měniče AC-0

50		4.0	n <sub>1</sub> = 2800		XC - XF										XA				
			i <sub>n</sub>	n <sub>2</sub> [min <sup>-1</sup> ]	T <sub>2</sub> [Nm]	P <sub>1</sub> [kW]	FS'	Vstup - Input - IEC								T <sub>2M</sub> [Nm]	P [kW]	Rd	P <sub>10</sub>
								XC		XF				B14					
								B5/B14		B5		B14							
7.5	373	34	1.5	1.5	80	71	—	80	71	63	80	71	—	51	2.3	0.88	—		
10	280	44	1.5	1.2										54	1.8	0.86			
15	187	47	1.1	1.2										57	1.3	0.84			
20	140	42	0.75	1.4										58	1.0	0.81			
25	112	50	0.75	1.0										50	0.75	0.78			
30	93	42	0.55	1.3	—	63	80	71	63	80	71	—	55	0.71	0.75				
40	70	54	0.55	1.0									54	0.63	0.72				
50	56	43	0.37	1.3									56	0.48	0.68				
65	43	53	0.37	1.0									53	0.37	0.64				
80	35	41	0.25	1.2									48	0.29	0.61				
100	28	35	0.18	1.3										45	0.23	0.58			

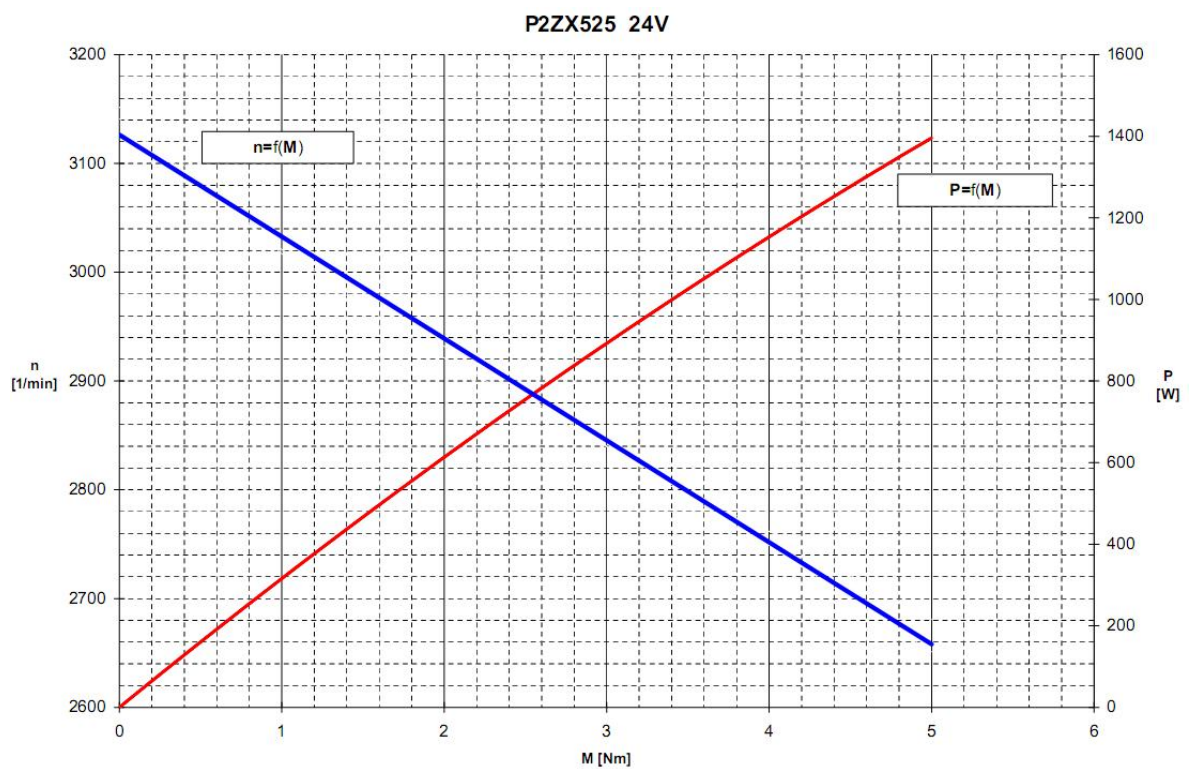
Tab.P3 Parametry použité převodovky



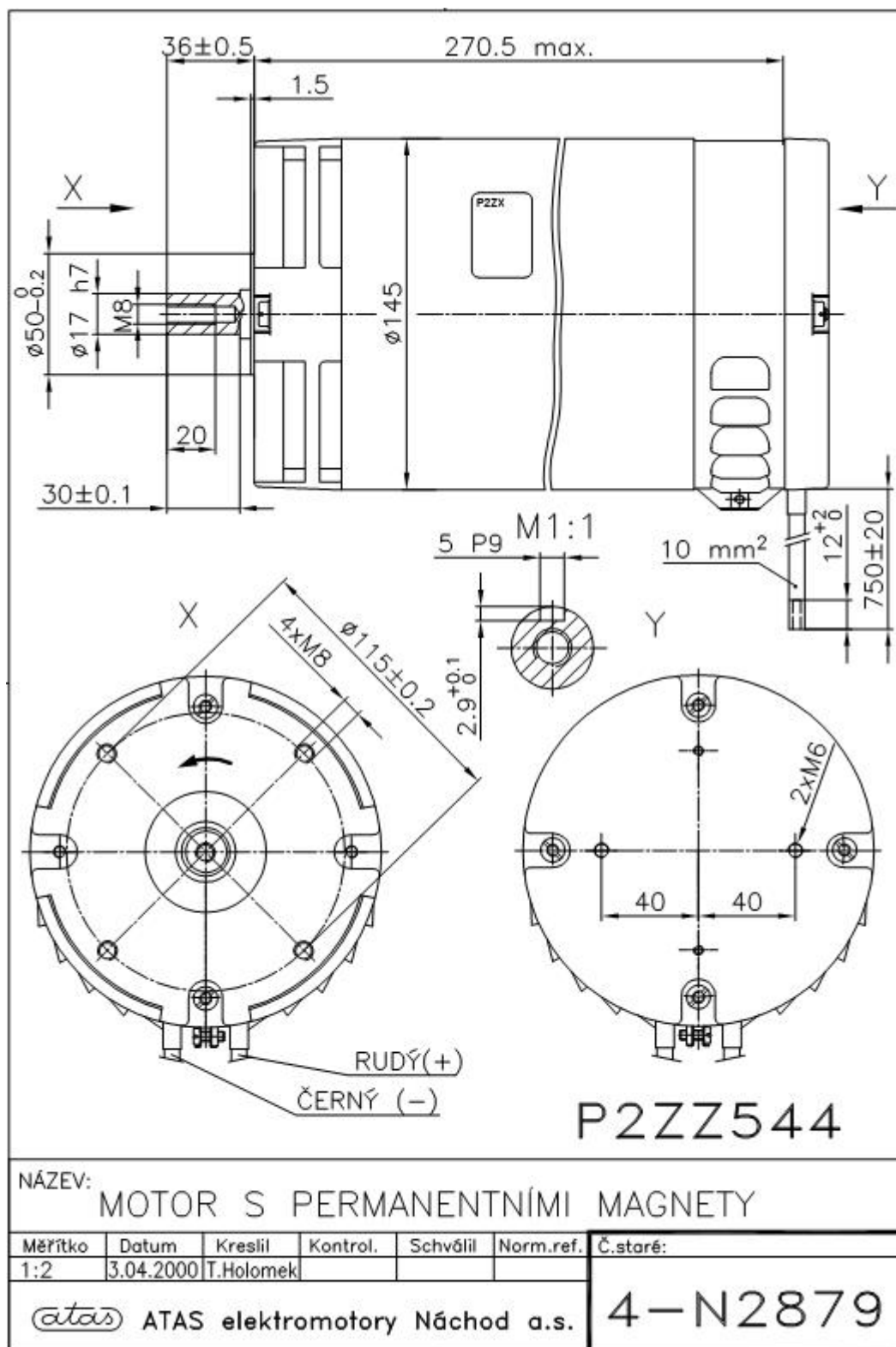
Obr.P1 Provozní charakteristiky motoru AMP4649



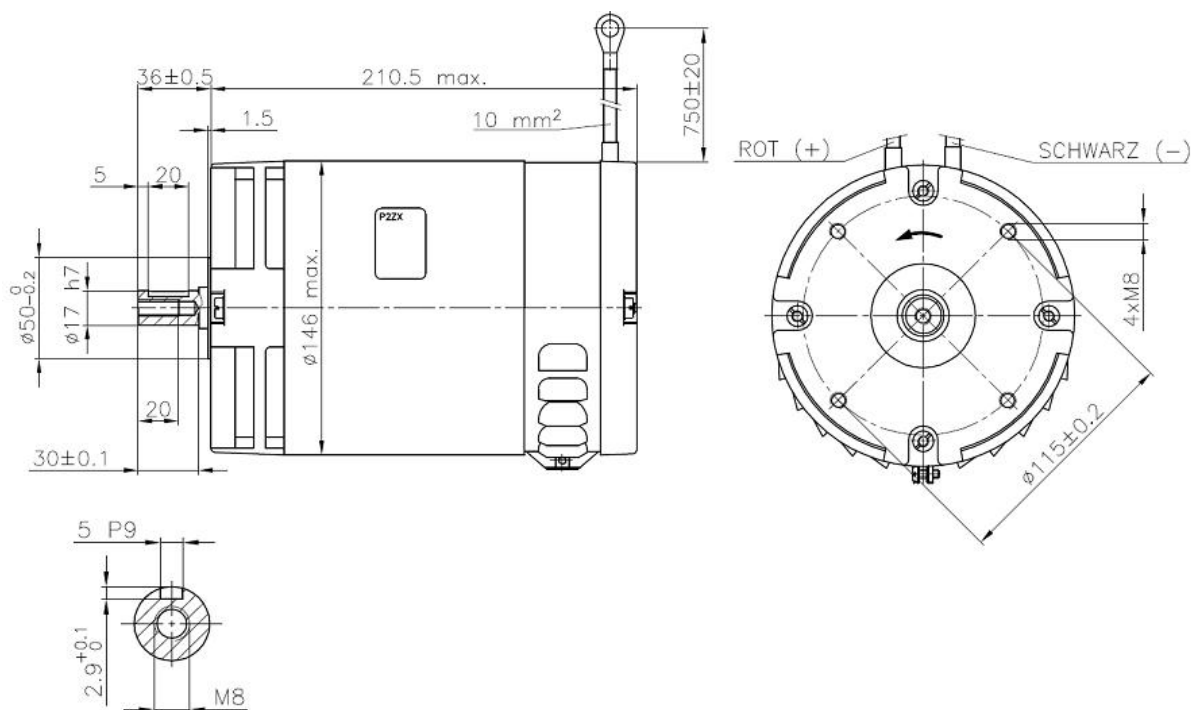
**Obr.P2** Závislost proudu a účinnosti motoru P2ZX525 na momentu



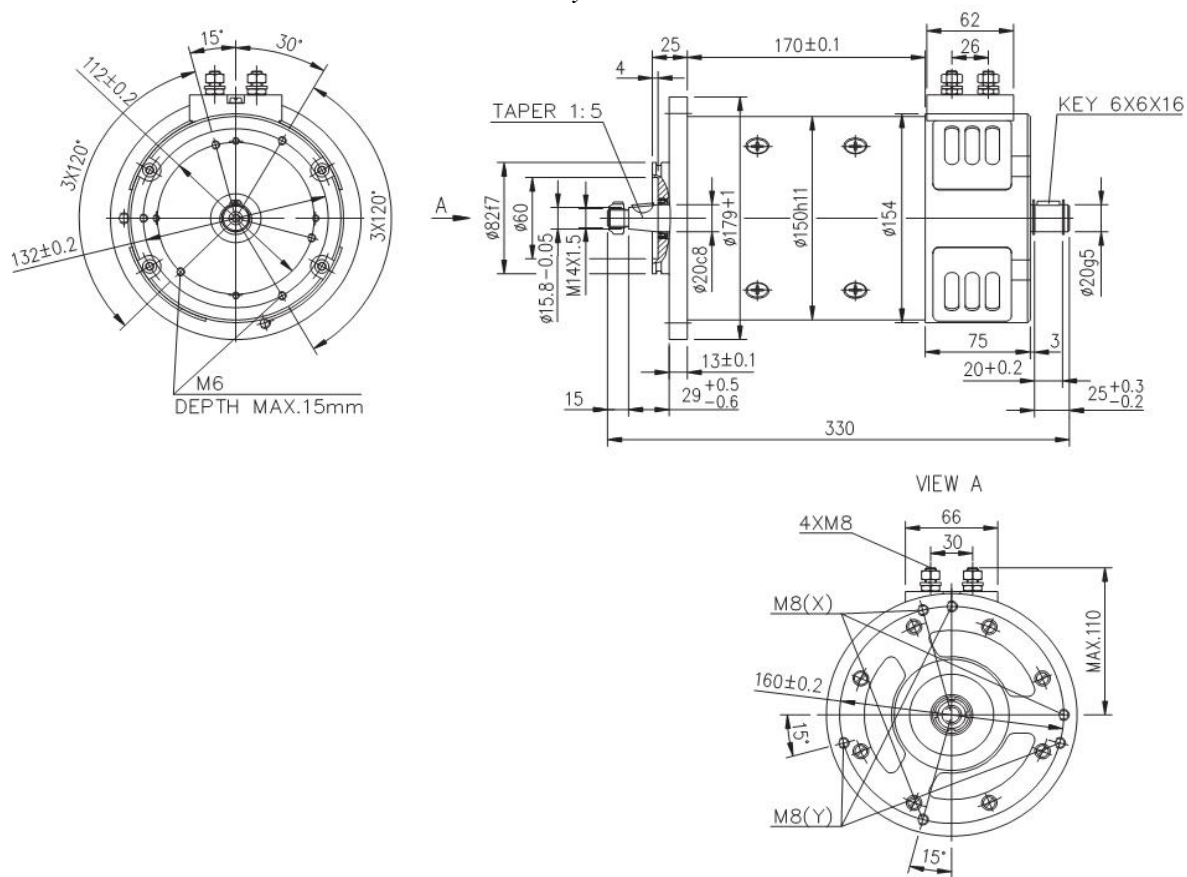
**Obr.P3** Závislost otáček a výkonu motoru P2ZX525 na momentu



Obr.P4 Rozměry motoru P2ZZ544



**Obr.P5** Rozměry motoru P2ZX525



**Obr.P6** Rozměry motoru AMP4649

